



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
27.02.2019 Patentblatt 2019/09

(21) Anmeldenummer: **18189240.7**

(22) Anmeldetag: **16.08.2018**

(51) Int Cl.:
B05B 1/08 (2006.01) **B08B 3/02** (2006.01)
B24C 5/04 (2006.01) **B26F 3/00** (2006.01)
E21C 25/60 (2006.01) **E21D 9/10** (2006.01)
E21B 7/18 (2006.01)

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(30) Priorität: **26.08.2017 DE 102017119610**

(71) Anmelder:
• **Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.**
80686 München (DE)

• **Technische Universität Bergakademie Freiberg**
09599 Freiberg (DE)

(72) Erfinder:
• **CHAVES Salamanca, Humberto**
09599 Freiberg (DE)
• **BOYE, André**
01156 Dresden (DE)
• **WEYRAUCH, Thomas**
01237 Dresden (DE)

(74) Vertreter: **Gottfried, Hans-Peter**
Patentanwalt
Messering 8f
01067 Dresden (DE)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERZEUGUNG EINER FOLGE VON STRAHLABSCHNITTEN EINES DISKONTINUIERLICHEN, MODIFIZIERTEN FLÜSSIGKEITSSTRAHLS**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Abschnitten eines Flüssigkeitsstrahls (20), wobei ein einzelner Strahlabschnitt (21) des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20) vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche (26) eine in Bewegungsrichtung (28) geringere Länge (L_f) hat als nach dem Austritt aus einer Düse (10). Erfindungsgemäß wird die Modifikation durch unterschiedliche Geschwindigkeiten innerhalb des einzelnen Strahlabschnitts (21) des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20) in der Weise hervorgerufen, dass infolge einer stetigen Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse (10) ein hinterer Strahlbereich einen vorderen Strahlbereich des Strahlabschnitts (21) einholt, indem der einzelne Strahlabschnitt (21) mit zunehmender Geschwindigkeit aus der Düse (10) austritt, je später er aus der Düse (10) austritt, und wobei ein Aufbrechen der zuvor zu dem Strahlabschnitt (21) vereinigten Flüssigkeit verhindert wird, indem ein kritisches Verhältnis von Trägheitskraft zur Oberflächenkraft nicht überschritten wird. Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Reinigung, zur Oberflächenbehandlung oder zum Schneiden.

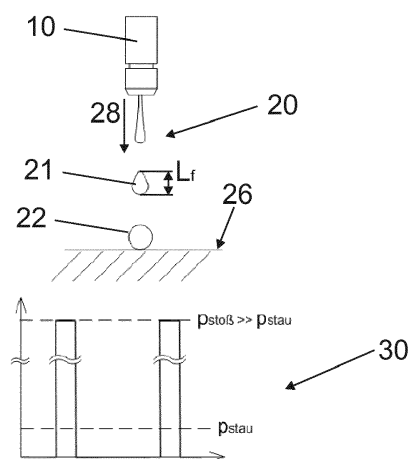


Fig. 11

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Strahlabschnitten eines diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls, wobei ein einzelner Strahlabschnitt des Flüssigkeitsstrahls eine solche Modifikation erfährt, dass er vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche eine in Bewegungsrichtung geringere Länge hat als nach dem Austritt aus der Düse. Die Erfindung betrifft weiterhin Verwendungen des Flüssigkeitsstrahls. Ein derartig modifizierter Strahl weist eine erhöhte mechanische Wirksamkeit auf, die beispielsweise zum Trennen oder Abtragen genutzt werden kann. Somit erfolgt eine Verbesserung der Erosionswirkung des Flüssigkeitsstrahls. Hierfür sieht der Stand der Technik häufig die Erzeugung eines pulsierenden Fluidstrahls aus einem mit Druck beaufschlagtem Fluid vor.

[0002] In der Industrie besteht branchenübergreifend die Forderung nach kürzeren Reinigungszeiten zur Verringerung von Taktzeiten. Dies betrifft beispielsweise die industrielle Bauteilreinigung in der Automobilbranche. Ebenso wird eine Steigerung der Maschinenverfügbarkeit, beispielsweise durch automatisierte Selbstreinigung von Verarbeitungsmaschinen, insbesondere im Lebensmittelsektor, gefordert. Die beiden vorgenannten Bereiche stellen zugleich Schlüsselanwendungen dar, in denen die Reinigung einen bedeutenden Prozessschritt in der Wertschöpfung darstellt. Im gesamten Bereich des Maschinenbaus müssen in der Regel vor jedem Weiterverarbeitungsschritt die Halbzeuge, Roh- und Bauteile sowie Baugruppen gereinigt werden. Hier kann ein modifizierter Flüssigkeitsstrahl in einer Reinigungsroboterkammer für die formatflexible Reinigung industrieller Bauteile eingesetzt werden. Der zweite besonders interessante Anwendungsbereich betrifft die Produktion von hygienekritischen Verbrauchsgütern, wobei die Reinigung von Lebensmittel-

tanks einen vorteilhaften Einsatzbereich darstellt.

[0003] Die prinzipielle Wirksamkeit von pulsierenden Spritzreinigungssystemen ist in Fachkreisen und Industrie anerkannt, wobei Meinungen zu bisher angewandten, auf einer Strahlzerbrechung durch Störkonturen beruhenden Pulsationsverfahren geteilt bis eher ablehnend sind. Die bekannten Pulsationsverfahren, erzeugt durch Pumpen- oder Ventilschaltungen, haben Nachteile im auf der Zieloberfläche erzeugten Druckprofil. Sie erzeugen keine harte Pulsation, weswegen die Reinigungswirkung eingeschränkt ist, wenn auch besser als bei nichtpulsierenden Flüssigkeitsstrahlen.

[0004] Eine Reihe von derartigen Systemen findet sich auch im druckschriftlichen Stand der Technik. So beschreibt die Druckschrift DE 10 2011 080 852 A1 eine Vorrichtung und ein Verfahren für das Erzeugen eines pulsierenden Fluidstrahls aus mit Druck beaufschlagtem Fluid mit einem Leitungssystem, das wenigstens eine Düse aufweist. Die Vorrichtung besitzt weiterhin eine Kammer, in der eine Druckwellenerzeugungseinrichtung für das Erzeugen von Fluid-Druckwellen ausgebildet ist. Die Kammer kommuniziert mit dem Leitungssystem durch eine Austrittsöffnung für die erzeugten Fluid-Druckwellen. Die Vorrichtung enthält eine Einstelleinrichtung für das Steuern der Amplitude der Fluid-Druckwellen in dem Leitungssystem vor dem Düsenmund. Mit der Einstelleinrichtung kann eine Helmholtz-Zahl eingestellt werden, die aus dem Quotienten der Weglänge für die Fluid-Druckwellen zwischen der Austrittsöffnung der Kammer und dem Düsenmund der Düse in dem Leitungssystem und der Wellenlänge der Fluid-Druckwellen in dem Leitungssystem ermittelt wird. Der gebildete Fluidstrahl dient dem Abtrag von Material, wobei der Erosionseffekt einer behandelten Oberfläche verbessert werden soll. Dies umfasst Reinigen, Schneiden und Bohren.

[0005] Gemäß Absatz [0007] liegt der vorgeschlagenen Lösung der Gedanke zugrunde, dass sich durch Einkoppeln von Schwingungsenergie in Form von Druckwellen in einen Fluidstrahl, insbesondere in einen Fluidstrahl mit einem Druck von 20 bar, 30 bar oder auch mehr, Fluidpulse erzeugen lassen, bei denen die Schwingungsenergie in Bewegungsenergie umgewandelt ist. Dabei kann die durch Erzeugen von Druckwellen auf das Fluid übertragbare Bewegungsenergie maximiert werden, indem sichergestellt wird, dass die Reflexionen von Druckwellen in einem Leitungssystem für das Zuführen von mit Druck beaufschlagtem Fluid zu einer Düse die erzeugten Druckwellen nicht auslöschen, sondern aufgrund von Interferenz verstärken. Bei der vorgeschlagenen Vorrichtung kann deshalb das Verhältnis der wirksamen Weglänge, welche die Druckwellen in dem Leitungssystem von der Austrittsöffnung der Kammer bis an den Düsenmund einer Düse zurücklegen, und der Wellenlänge der Fluid-Druckwellen, d. h. eine die Fluid-Druckwellen in dem Leitungssystem charakterisierende Helmholtz-Zahl, eingestellt werden.

[0006] Weiterhin ist in Absatz [0060] ausgeführt, dass die Druckpumpe so ausgelegt ist, dass damit in Kammer ein Fluiddruck in dem Bereich zwischen 40 bar und 150 bar, vorzugsweise ein Fluiddruck in der Größenordnung von 100 bar, erzeugt und eingestellt werden kann. Durch Einstellen des Fluiddrucks in der Kammer, der Frequenz ν und der Amplitude der Druckwellen kann die Größe und der gegenseitige Abstand von Flüssigkeitströpfchen in aus der Düse austretenden Fluidstrahlen variiert werden.

[0007] Nach Absatz [0065] kann durch das Einstellen des Drucks und der Amplitude der Druckwellen in der Kammer die Strömungsgeschwindigkeit und die Gestalt des mit den Düsen erzeugten pulsierenden Fluidstrahls eingestellt werden. Auch die Bildung von einer Serie von Klumpen oder Tropfen, die auf einer festen Oberfläche auftreffen, wird gezeigt.

[0008] Die Druckschrift EP 2 145 689 A1 befasst sich mit einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Präparierung von Oberflächen mit einem Wasserstrahl, der unter Hochfrequenz forciert pulsierend ist. Dabei kommt ein Hochfrequenzsignalgenerator zum Einsatz, der die Hochfrequenz an einen Schwinger mit einer Mikrospitze überträgt. Die

vibrierende Mikrospitze erzeugt einen vibrierenden Wasserstrahl, der aus einer Düsenöffnung austritt. Der pulsierende Wasserstrahl mit den enthaltenen Mini-Wasserkugeln weist dabei eine verbesserte Erosionsfähigkeit auf, z. B. zum Schneiden oder Reinigen.

[0009] Aus der Druckschrift US 3 687 147 A ist ein Verfahren bekannt, bei dem zwei Strahlen eines inkompressiblen Fluids in einem spitzen Winkel zueinander stehen und derart in Wechselwirkung treten, dass sich, neben einer Erhöhung der Geschwindigkeit, einzelne Flüssigkeitsklumpen von endlicher Länge und Dauer bilden.

[0010] Ein weiteres Verfahren zur Flüssigkeitsstrahlformung sowie eine hierzu geeignete Vorrichtung beschreibt die Druckschrift DE 600 28 949 T2. Die Vorrichtung zum Herstellen eines Hochdruckfluidstrahls zum Behandeln einer ausgewählten Oberfläche umfasst dabei eine Düse und eine Zuführleitung mit einer ersten Leitungsöffnung, die in Fluidverbindung mit der Düsenöffnung steht, wobei die Zuführleitung des Weiteren eine zweite Leitungsöffnung umfasst, die beabstandet von der ersten Leitungsöffnung zum Ausrichten des Fluidstrahls dient. Die Düse und/oder die Zuführleitung weist wenigstens eine Öffnung stromaufwärts von der zweiten Leitungsöffnung auf, wobei die Öffnung so ausgestaltet ist, dass sie an die Quelle des zweiten Fluids anschließbar ist. Die Öffnung ist eine erste Öffnung, wobei die Düse und/oder die Zuführleitung des Weiteren eine zweite Öffnung, beabstandet zu der ersten Öffnung, umfasst. Die ersten und zweiten Öffnungen sind an unterschiedlichen Orten entlang der Achse, die sich zwischen der ersten Leitungsöffnung und der zweiten erstreckt, positioniert. Eine Länge des Leitungskanals zwischen den ersten und zweiten Öffnungen ist wenigstens ungefähr zehnmal größer als der durchschnittliche Durchmesser der zweiten Leitungsöffnung.

[0011] Das kontrollierte Einbringen eines zweiten Fluids umfasst das periodische Unterbrechen eines Flusses des zweiten Fluids in Richtung des Fluidstrahls zum Pulsieren des Fluidstrahls. Des Weiteren umfasst das Selektieren von wenigstens der Länge der Leitung und/oder dem Druck des zweiten Fluids und/oder der Durchflussrate des zweiten Fluids dergestalt, dass der Hochdruckfluidstrahl in Resonanz versetzt wird, wenn der Hochdruckfluidstrahl durch die Leitung läuft.

[0012] Aus der Druckschrift DE 215 20 05 A1 ist eine hydraulische Kammer mit Austrittsdüse bekannt. Eine Hydraulikkammer, die eine Düse enthält, die in der Lage ist, einen sehr hohen momentanen gepulsten dynamischen Strahl in einer Vorrichtung bereitzustellen, die eine Stoßwelle in einer relativ inkompressiblen Flüssigkeit erzeugt, wird erhalten, wenn der effektive Ort der Stoßwelle so ist, dass die dadurch erzeugte Druckwelle zum Aufbau schnell und gleichmäßig in einer Richtung entlang der Mittellinie der Düse aufgebracht wird. Eine geeignete Konfiguration für eine solche Kammer ist ein parabolischer Cissoid, bei dem der Ort der Stoßwelle effektiv am Brennpunkt des parabolischen Teils einer solchen Kammer ist, wodurch die resultierenden sphärischen Wellen in additive ebene Wellen in Richtung der Mittellinie der Düse umgewandelt werden. Die in der Vorrichtung verwendete Stoßwelle kann durch mechanische oder elektrische Energie oder eine Kombination davon hergestellt werden.

[0013] Die Druckschrift DE 334 35 55 C1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Beschleunigung von Flüssigkeitsmengen. Einzelne bestimmte Flüssigkeitsmengen werden unter Aussetzung der durch Komprimieren der Flüssigkeit gespeicherten Energie auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Die Flüssigkeit wird zur Vornahme der Kompression in ein bereits mit Flüssigkeit gefülltes Druckgefäß gepresst. Aufgrund der in der komprimierten Flüssigkeit gespeicherten Energie wird eine bestimmte Flüssigkeitsmenge aus dem Druckgefäß in eine Sammeldüse ausgestoßen, wenn ein Ventil rasch geöffnet wird. Das Ventil wird geöffnet, wenn eine durch die komprimierte Flüssigkeit erzeugte Öffnungskraft eine schließende Vorspannung übersteigt. Durch wiederholtes Einführen von Hochdruckflüssigkeit in das Druckgefäß nimmt das Ventil automatisch Arbeitsspiele vor, um eine Folge von pulsierenden Flüssigkeitsstrahlen zu erzeugen. Das rasche Öffnen des Ventils wird über einen Ansatz an dem Ventilelement unterstützt, der dichtend innerhalb des Durchgangs der Sammeldüse gleitet, um die Freigabe der Flüssigkeit so lange zu blockieren, bis das Ventilelement ausreichend beschleunigt, damit die benötigte Öffnungsgeschwindigkeit erreicht wird, wenn der Ansatz den Düsen-durchgang freigibt.

[0014] In Absatz [0005] wird konkretisiert, dass pulsierende Strahlvorrichtungen vorzugsweise eine "Sammel"-Düse verwenden, wie beispielsweise die in der Patentschrift US 33 43 794 beschriebene Vorrichtung, bei der eine Energie enthaltende Flüssigkeitsmenge dem Einlass einer trockenen Düse zugeführt wird. Der vorderste Abschnitt der Flüssigkeitsmenge wird stark beschleunigt, wenn sie längs des sich verengenden Kanals der Sammeldüse fließt, der den größten Teil der Energie der Flüssigkeitsmenge als kinetische Energie in einem kleinen Teil der Flüssigkeitsmenge konzentriert. Der resultierende kurzzeitige Flüssigkeitsstrahl, der aus der Düse austritt, besitzt einen Spitzenstaudruck, der mehrfach größer ist als der statische Druck, der irgendwo innerhalb der Düse auftritt. Mit dem Flüssigkeitsstrahl sind auch diskrete Volumina oder Flüssigkeitsklumpen umfasst (vgl. US 4 863 101 A, die zur selben Patentfamilie gehört wie DE 334 35 55 C1).

[0015] Eine weitere Konkretisierung liefert die Beschreibung in Absatz [0033]. Hiernach kann beispielsweise bei einer Vorrichtung, die zur Bearbeitung von Felsen, Beton und anderen harten Werkstoffen anstelle eines konventionellen Bohrhammers genutzt wird, Druckwasser mit etwa 1379 bar einer Kammer zugeführt werden, die einen Innendurchmesser von etwa 20 cm aufweist. Dieser Druck könnte zu einer Kompression von etwa 5% führen und würde in die Düse Wassermengen mit jeweils einem Volumen von etwa 213 cm³ mit einer Impulsenergie von etwa 13 560 J ausstoßen.

[0016] Ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erzeugung von gepulsten Flüssigkeitsstrahlen beschreibt ebenfalls die

Druckschrift DE 215 20 03 A. Die vorgeschlagene Lösung erzeugt die mit hoher Frequenz gepulsten Wasserstrahlen durch die Entladung elektrischer Energie und geht von der Erkenntnis aus, dass bei der Entladung von elektrischer Energie aus beispielsweise einem Kondensator in einem geschlossenen und mit einer Flüssigkeit gefüllten Behälter über Elektroden zwischen den Elektroden ein schlauchförmiger Raum entsteht. In diesem herrschen sehr hohe Temperaturen vor. Entladungen dieser Art haben drei Wirkungen. Zum einen verläuft eine Hochdruck-Schallwellenfront von dem Entladungsschlauch nach außen. Zum zweiten entsteht im Bereich des Schlauches eine sehr heiße und expandierende Gasblase, welche überhitzten Dampf und eine erhebliche Menge ionisierter und neutraler Moleküle enthält. Zum dritten entsteht gleichzeitig mit der Entladung ein hochintensives Kontinuum Licht. Der Druckstoß erfolgt durch Aufheizen zumindest eines Teils eines mit Ausnahme einer Austrittsdüse geschlossenen Flüssigkeitsvolumens durch eine elektrische Entladung innerhalb der Flüssigkeit mit solcher Entladungsdauer und -stärke, dass in der Flüssigkeit eine Stoßwelle entsteht.

[0017] Aus der Druckschrift DE 372 48 64 C1 kann der Fachmann Kenntnisse über ein Hochdruckwasserstrahlgerät mit pulsierendem Wasserstrahl entnehmen. Das vorgeschlagene Hochdruckwasserstrahlgerät zur Erzeugung pulsierender Wasserstrahlen hat einen gasbelasteten Druckspeicher, der an eine Zuleitung angeschlossen und über eine Rohrleitung mit einem Hauptschwingungserzeuger verbunden ist. Austrittsseitig ist an den Hauptschwingungserzeuger über eine Rohrleitung mit einem eingebauten Rückschlagventil ein zweiter Schwingungserzeuger angeschlossen, in dessen Gehäuse ein Ventilkolben den Eintrittsstutzen mit einer Austrittsdüse verbindet bzw. von dieser abtrennt. An den Eintrittsstutzen des zweiten Schwingungserzeugers ist ein zweiter gasbelasteter Druckspeicher angeschlossen, in dem in Zusammenwirkung mit dem Rückschlagventil die Spitzendrücke der vom Hauptschwingungserzeuger ankommenden Druckwellen gespeichert werden und so eine stufenweise Aufladung stattfindet, bis der Auslösedruck auf den Ventilkolben erreicht ist und die gespeicherte Energie sich in einem kräftigen Wasserstrahl entlädt.

[0018] Das in der den Hauptschwingungserzeuger mit dem zweiten Schwingungserzeuger verbindenden Rohrleitung angeordnete Rückschlagventil gestattet es, den zweiten Druckspeicher stufenweise aufzuladen, indem nur die Spitzendrücke der vom Hauptschwingungserzeuger im Eigenschwingungszustand erzeugten Druckwellen durchgelassen werden. Die Energie dieser Hochdruckimpulse wird im zweiten Druckspeicher gespeichert und bei Erreichen des an der Quelle gleichbleibenden Druckes einstellbaren Auslösedrucks in einem einzigen kräftigen Wasserstrahlimpuls entladen.

[0019] Zu den weiteren Druckschriften, die sich der Erzeugung perkussiver Flüssigkeitsstrahlen widmen, gehört die US 3 924 805 A. Dieses Verfahren erzeugt den perkussiven Flüssigkeitsstrahl aus einer kontinuierlichen Strahlentladung, bestehend aus der Erzeugung einer relativ kleinen zyklischen Variation der Austragsgeschwindigkeit um ihren Zeitmittelwert, wobei dem Freistrahle eine Längsänderung der Vorwärtsgeschwindigkeit gegeben wird. Diese zwingt den Freistrahle, um zu einem gebündelten Strahl zu werden, zu einer Änderung des lateralen Durchmessers, die periodisch entlang der Länge des Strahls auftritt. Die zyklische Variation der Austragsgeschwindigkeit wird dabei durch Erzeugen einer zyklischen Veränderung des Flüssigkeitsdrucks am Einlass zu einer Ausstoßdüse erhalten.

[0020] Die resultierende Bewegung kann als eine Vorwärtsbewegung des Strahlabschnitts bei der Durchschnittsgeschwindigkeit u betrachtet werden, während der betreffende Teil der Flüssigkeit dazu neigt, infolge der Geschwindigkeitsänderung zu der Mitte dieses Teils zu strömen. Wenn sich also der Abschnitt des Strahls vorwärts bewegt, neigt er auch dazu, den Durchmesser zu verringern oder zu vergrößern. Das heißt, er neigt dazu, sich zu "bündeln". Der Prozess kann auch so betrachtet werden, dass der Teil der schnelleren Flüssigkeit den langsameren innerhalb des Zyklus überholt und sich mit diesem verbindet. Der Prozess geht notwendigerweise mit einer Trennung jedes langsamen (dadurch gebündelten) Strahlteils von den vorhergehenden und nachfolgenden einher. Somit hat die zyklische Änderung der Ausstoßgeschwindigkeit den Effekt, den kontinuierlichen Strahl von einem gleichförmigen Strom in eine Sequenz von Flüssigkeitspfropfen umzuwandeln.

[0021] Der zuvor in unterschiedlichen Varianten beschriebene Effekt erfolgt jedoch zufällig und unkontrolliert, zumindest aber ohne besondere Wirkungen, die über die aus dem Stand der Technik bereits bekannten Wirkungen pulsierender Flüssigkeitsstrahlen hinausgehen würden.

[0022] Die Offenbarung eines Flüssigkeitsausstoßsystems mit Tropfengeschwindigkeitsmodulation findet sich in der Druckschrift EP 2 714 406 A1. Das kontinuierliche Flüssigkeitsausstoßsystem umfasst eine Flüssigkeitskammer in fluidischer Verbindung mit einer Düse, wobei die Flüssigkeitskammer Flüssigkeit unter Druck enthält, der ausreicht, um einen Flüssigkeitsstrahl durch die Düse auszustoßen. Eine Tropfenbildungsvorrichtung ist mit dem Flüssigkeitsstrahl verbunden, wobei die Tropfenbildungsvorrichtung betreibbar ist, um eine Modulation in dem Flüssigkeitsstrahl zu erzeugen. Dies bewirkt, dass Teile des Flüssigkeitsstrahls in eine Reihe von Tropfenpaaren zerbrechen, die sich entlang eines Weges bewegen, wobei jedes Tropfenpaar aus einem ersten und einem zweiten Tropfen besteht.

[0023] Eine Aufladevorrichtung umfasst eine Ladungselektrode, die dem Flüssigkeitsstrahl zugeordnet ist, und eine Quelle mit variierendem elektrischem Potential zwischen der Ladungselektrode und dem Flüssigkeitsstrahl. Die Quelle des variierenden elektrischen Potentials stellt eine Wellenform bereit, die eine Periode enthält, die gleich der Tropfenpaarperiode ist. Die Wellenform enthält einen ersten und einen zweiten unterschiedlichen Spannungszustand, wobei die Aufladevorrichtung mit der Tropfenbildungseinrichtung synchronisiert ist, um einen ersten Ladungszustand auf dem ersten Tropfen zu erzeugen und um einen zweiten Ladungszustand auf dem zweiten Tropfen zu erzeugen. Die

Tropfengeschwindigkeitsmodulationsvorrichtung ändert die Relativgeschwindigkeit des ersten und des zweiten Tropfens, um die Verbindung der Tropfen zu einem kombinierten Tropfen mit einem dritten Ladungszustand zu steuern. Es ist eine Ablenkvorrichtung vorgesehen, die bewirkt, dass der erste Tropfen mit dem ersten Ladungszustand sich entlang eines ersten Weges bewegt, der zweite Tropfen mit dem zweiten Ladungszustand sich entlang eines zweiten Weges bewegt und der kombinierte Tropfen mit dem dritten Ladungszustand sich auf einem dritten Pfad bewegt.

[0024] Da geringfügige Änderungen in der Amplitude die Wellenform der Energieimpulse, die zum Flüssigkeitsstrahl zur Tropfenbildung übertragen werden, die Geschwindigkeit der gebildeten Tropfen beeinflussen, kann die Geschwindigkeit eines oder beider Tropfen in einem Tropfenpaar moduliert werden. Das wird erreicht, indem die Eigenschaften der auf den Flüssigkeitsstrahl übertragenen Energie verändert werden.

[0025] Die Druckschrift EP 2 485 847 A2 lehrt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von Zylinderbohrungsflächen mit einem gepulsten Wasserstrahl. Die Vorbereitung einer Oberfläche einer Zylinderbohrung erfolgt unter Verwendung eines gepulsten Wasserstrahls. Folgende Verfahrensschritte sind vorgesehen: Erzeugen eines Signals mit einer Frequenz unter Verwendung eines Signalgenerators; Anlegen des Signals zur Erzeugung eines gepulsten Wasserstrahls durch eine Austrittsöffnung einer Düse mit einer Austrittsöffnung und mit einem zylindrischen Abschnitt der Austrittsöffnung; Veranlassen, dass der gepulste Wasserstrahl auf die Oberfläche der Zylinderbohrung auftrifft, um die Oberfläche innerhalb eines vorbestimmten Bereichs der Oberflächenrauigkeit vorzubereiten. Der vorbestimmte Bereich der Oberflächenrauigkeit wird ausgewählt anhand von Betriebsparametern, die einen Abstand, eine Traversengeschwindigkeit der Düse, einen Wasserdruck, eine Wasserströmungsrate, ein Öffnungslängen-zu-Durchmesser-Verhältnis, die Frequenz und eine Amplitude des Signals umfassen.

[0026] Gemäß einem Aspekt der vorgeschlagenen Lösung, beschrieben in den Absätzen [0015] und [0035], kann der gepulste Wasserstrahl durch die Erzeugung hochfrequenter pulsierender Flüssigkeitsstrahlen erzeugt werden. Diese Hochfrequenz-Flüssigkeitsstrahlen können mit internen mechanischen Strömungsmodulatoren, Helmholtz-Oszillatoren, selbstresonierenden Düsen und/ oder Ultraschalldüsen erzeugt werden. Zusätzlich kann der gepulste Wasserstrahl unter Verwendung von akustischen Wellen erzeugt werden, beispielsweise durch eine akustische Welle, die mittels eines akustischen Wandlers auf die Flüssigkeit einwirkt. Die angestrebte Wirkung basiert darauf, dass der Wasserstrahlaufprall auf ein Materialtarget durch Ultraschallmodulation vergrößert wird. Wenn nämlich ein Tropfen oder ein Flüssigkeitspfropfen auf die gleiche Oberfläche schlägt, wird der anfängliche Aufpralldruck viel höher sein.

[0027] Bei einem weiteren Beispiel, beschrieben in Absatz [0039], würde eine auf 69 MPa eingestellte Pumpe einen Schlagwasserdruck auf der Zielfläche 566 MPa erreichen. Da das Verhalten des Materials von dem Aufpralldruck und der Zeit abhängt, die wiederum durch die Frequenz und den Düsendurchmesser bestimmt werden, wird durch die Verwendung von erzwungenen gepulsten Wasserstrahlen eine signifikante Verbesserung der Materialerosion oder der Oberflächenvorbereitung erreicht.

[0028] Aus den Druckschriften EP 2 877 697 A1 bzw. WO 2014/018977 A1 ist ein Hyperdruckpulsbagger bekannt. Zur Erzeugung eines Fluidpulses ist ein Hyperdruck-Wasserkanonensystem vorgesehen. Dieses umfasst einen Druckbehälter, der mit einer Quelle für unter Druck stehendes Fluid gekoppelt ist, wobei der Druckbehälter ein Ablassventil umfasst. Eine Düse weist einen geraden Abschnitt und einen konvergierenden verjüngten Abschnitt auf, wobei die Düse mit dem Druckbehälter nach einem Ablassventil verbunden ist. Die Geschwindigkeit des unter Druck stehenden Fluids, das durch das Ablassventil aus dem Druckbehälter abgegeben wird, nimmt zu, wenn es durch die Düse fließt.

[0029] In der Praxis ändert sich die Geschwindigkeit des aus dem Kanonenventil austretenden Wassers kontinuierlich, es wird jedoch ein Impuls von etwa 0,5 m Länge mit einer Geschwindigkeit von über 500 m/s erzeugt. Die kinetische Energie des Impulses steigt linear bis etwa 0,5 m an und steigt dann mit einer niedrigeren Rate weiter an. Die Geschwindigkeit ist niedrig, wenn sich das Ventil öffnet, erreicht einen Spitzenwert nach dem Öffnen des Ventils und fällt dann ab, wenn auch der Druck abfällt (dekomprimiert). Ein gerader Düsenabschnitt akkumuliert das Wasser an der Vorderkante des Impulses und ermöglicht, dass das Fluid mit der höheren Geschwindigkeit aufholt, wodurch ein Flüssigkeitspfropfen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit gebildet wird.

[0030] Eine numerische Analyse zeigt, dass ein komprimiertes Wasserkanonenwerkzeug komprimierten Wasserimpuls erzeugen kann, der 300 mm lang ist und sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 520 m/s bewegt. Die Vorderkante beschleunigt auf über 2000 m/s, während die Hinterkante abbremst.

[0031] Neben dem druckschriftlichen Stand der Technik sind weitere Veröffentlichungen bekannt, die sich auf das Gebiet der Modulation von Flüssigkeitsstrahlen beziehen. Die Modulation von Flüssigkeitsstrahlen ist jedoch bisher fast ausschließlich zur Erhöhung des Wirkungsgrades beim Wasserstrahlschneiden von Gestein und harten Materialien betrachtet worden, wie auch der zuvor gewürdigte Stand der Technik zeigt. Hierbei wird im Hochdruckbereich $p \geq 1000$ bar gearbeitet. Veröffentlichungen hierzu enthalten die Tagungsbände der Water Jet Conferences und der Jet Cutting Symposia (Cooley, W. C.: Rock Breakage by Pulsed High Pressure Water Jets, First International Symposium on Jet Cutting Technology, Paper B7, 1972; Nebeker, E. B.; Rodriguez, S. E.: Percussive Water Jets for Rock Cutting, Third International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Paper B-1, 1976; Nebeker, E. B.: Development of Large-Diameter Percussive Jets, First U. S. Water Jet Symposium, Colorado School of Mines, pp. IV5.1-11, 1981; Nebeker, E. B.: Standoff Distance Improvement Using Percussive Jets, Proc. 2nd U.S. Water Jet Conference,

WJTA, pp. 25-34, 1983; Dehkhoda, S.: Experimental Study of Rock Breakage with Pulsed Waterjet, 8th Asian Rock Mechanics Symposium ARMS8, Sapporo, Japan, 2014). Dabei wurden Methoden untersucht, um den Wasserstrahl zu unterbrechen bzw. zu zerhacken (Metcalf, R. A.; Davies, T. W.: Experimental Study of the Impact of Broken Water Jets, 4th International Symposium on Jet Cutting Technology, 1978; Lichtarowicz, A.; Nwachukwu, G.: Erosion by an Interrupted Jet, Proc. 4th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp.13-18, 1978; Vijay, M.M.; Remisz, J.; Shen, X.: Fragmentation of Hard Rocks with Discontinuous Water Jets, Proc. 3rd Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, pp.201-224, 1992), nicht jedoch diesen zielgerichtet zu modulieren. Dieses Zerhacken geschieht vorwiegend im für diesen hohen Druck relativ niederfrequenten Bereich bis ca. 100 Hz. Andere Veröffentlichungen benutzen zur Modulation des Strahls Resonatoren in der Düse (Chahine, G. L.; Conn, A. F.; Johnson, V. E.; Frederick, G. S.: Cleaning and Cutting with Self-Resonating Pulsed Water Jets, Proc. 2nd U.S. Water Jet Conference, WJTA, pp.167-173, 1983; Conn, A.F.: Asbestos Removal with Self-Resonating Water Jets, Proc. 5th U.S. Water Jet Symposium, pp.133-139, 1989; Bortolussi, A., R.; Ciccu, W.M.; Kim, P.P.; Manca, P.; Massacci, G.: Jet Power Optimization in Granite Kerfing Using Oscillating Nozzles, Proc. 6th American Water Jet Conference, pp.71-86, 1991). Diese Systeme liefern Pulsationen im Bereich von einigen kHz. Erst in letzter Zeit wurden mit Ultraschall modulierte Strahlen von der Gruppe um Foldyna für die Bearbeitung und Reinigung von Beton (Foldyna, J.; Sitek, L.; Svehla, B.; Svehla, S.: Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects, Ultrasonics Sonochemistry, 11, pp. 131-137, 2004; Bodnárová, L.; Sitek, L.; Hela, R.; Foldyna, J.: New Potential Of Highspeed Water Jet Technology For Renovating Concrete Structures, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. XIX, No. 2, pp.1-7, 2011) oder für den Abtrag von Asbest angewandt. Eine Anwendung von pulsierenden bzw. unterbrochenen Flüssigkeitsstrahlen zum Zwecke der Reinigung im Niederdruckbereich findet man erst ab 2010 (Augustin W.; Fuchs T.; Föste H.; Schöler, M.; Majschak, J.-P.; Scholl, S.: Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing, Food and Bioproducts Processing 88, pp. 384-391, 2010; Weidemann, C.; Vogt, S.; Nirschl, H.: Cleaning of filter media by pulsed flow - Establishment of dimensionless operation numbers describing the cleaning result, Journal of Food Engineering, 132, pp. 29-38, 2014; Stoye, H.; Köhler, H.; Mauermann, M.; Majschak, J.-P.: Untersuchungen zur Steigerung der Reinigungseffizienz durch pulsierende Spritzreinigung, Chem. Ing. Tech., 86, No. 5, pp. 707-713, 2014).

[0032] Ein grundlegender Nachteil des Stands der Technik ist es, dass für die Spritzreinigung keine Verringerung der Reinigungszeit durch signifikante Erhöhung der Reinigungsmechanik möglich ist. Dabei bilden, neben der Zeit und der Mechanik, die Temperatur und die Chemie die weiteren wichtigen Einflussfaktoren auf die Reinigung. Die Erhöhung der Temperatur sowie des Chemieeinsatzes stellt jedoch aus Umwelt- und Kostenaspekten keine gesellschaftlich akzeptable Alternative zur Minimierung der Zielgröße Reinigungszeit dar. Des Weiteren ist der als mögliche Stellgröße für die Erhöhung der Mechanik dienende, maximal einstellbare Betriebsdruck des Reinigungssystems in der Regel anlagen- oder prozesstechnisch nach oben limitiert. So liegt der für die Spritzreinigung wirtschaftlich interessante und am meisten verwendete Bereich zwischen 2 und 6 bar. Gründe dafür sind, dass hier der Aufwand für die Pumpen sowie die Arbeits- und Schallschutzmaßnahmen in einem günstigen Verhältnis zum Reinigungsergebnis stehen und die derzeit verbreiteten Reinigungschemikalien auf diesen Druckbereich ausgelegt sind. Auch die Erhöhung des durch das Reinigungssystem geförderten Volumenstroms ist aus Sicht der Ressourceneffizienz und wegen der nachträglich erforderlichen Abwasserbehandlung nicht praktikabel. Folglich sind neue Ansätze gefragt, mit welchen die mechanische Reinigungskomponente bei gleichzeitiger Ressourcenschonung weiter erhöht werden kann.

[0033] Mit den zuvor beschriebenen, aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren ist es möglich, einzelne Abschnitte eines Flüssigkeitsstrahls abzugeben oder dem Flüssigkeitsstrahl eine mehr oder minder gesteuerte Pulsation aufzuprägen, so dass im Vergleich zu einem kontinuierlichen Flüssigkeitsstrahl ein höherer Energieeintrag in die Zioberfläche und ein besseres Ergebnis bei einer Bearbeitung der Zioberfläche, z. B. eine erwünschte Abrasion, erreicht werden können. Hierzu sind verschiedenartige Vorrichtungen vorgeschlagen worden, die durch zusätzliche Einrichtungen, wie eine zusätzliche Strahlerzeugung oder eine Oszillationseinrichtung, zur eigentlichen Strahlerzeugung aufwändig, teuer und störanfällig sind. Zudem existiert in der Spritzreinigung derzeit kein Pulsationsverfahren, welches eine geeignete Strahlmodulation aufweist, um eine maximal harte Pulsation gemäß den potenziellen Möglichkeiten der Flüssigkeit auf der zu reinigenden Oberfläche zu erzeugen.

[0034] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erzeugung eines modifizierten Flüssigkeitsstrahls mit erhöhter mechanischer Wirksamkeit anzubieten, die einfach aufgebaut ist und bei vermindertem Flüssigkeitsbedarf eine weiter verbesserte Wirkung, insbesondere einen verbesserten Abrasionseffekt, aufweist.

[0035] Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur Erzeugung einer Folge von Abschnitten eines Flüssigkeitsstrahls, wobei ein einzelner Strahlabschnitt des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche eine in Bewegungsrichtung geringere Länge hat als nach dem Austritt aus einer Düse. Erfindungsgemäß wird die Modifikation durch unterschiedliche Geschwindigkeiten innerhalb des einzelnen Strahlabschnitts des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls in der Weise hervorgerufen, dass infolge einer stetigen Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse ein in Bewegungsrichtung hinterer Strahlbereich einen vorderen Strahlbereich des Strahlabschnitts einholt, indem der einzelne Strahlabschnitt mit zunehmender Geschwindigkeit aus

der Düse austritt, je später er aus der Düse austritt, und wobei ein Aufbrechen der zuvor zu dem Strahlabschnitt vereinigten Flüssigkeit verhindert wird, indem ein kritisches Verhältnis von Trägheitskraft zur Oberflächenkraft nicht überschritten wird.

[0036] Der Mechanismus eines modifizierten Flüssigkeitsstrahls mit erhöhter mechanischer Wirksamkeit, mit dessen Hilfe in der Natur Schützenfische Insekten jagen, wurde wissenschaftlich aufgeklärt. Eine ganz definierte Modulation sowohl der als Düsenfläche fungierenden Mundöffnung als auch des Drucks in der Mundhöhle der Fische liefert eine stetige Erhöhung sowohl der Wasserstrahlgeschwindigkeit als auch des Wasserstrahlimpulses über der Zeit. Diese besondere Form der Beschleunigung des Wassers führt dazu, dass sich eine Ansammlung von Wasser an der Spitze des Strahles mit dem gesammelten Impuls aufbaut, der über die Dauer des Auswurfs aus der Mundöffnung des Fisches abgegeben wurde. Dieser "Wasserklumpen" vermag deshalb bei dem kurzen Zusammenprall mit dem Insekt eine Kraft aufzubringen, die einem Vielfachen der Kraft des einfachen Wasserstrahls entspricht, denn Kraft ist die zeitliche Ableitung des Impulses. Die Erfindung hat sich daher zum Ziel gesetzt, über die gesamte Strahllänge, die dem Abstand zwischen Düse und Zielfläche entspricht, einen Impuls zu sammeln, um diesen dann in einem sehr kurzen Stoß in eine starke Kraft umzuwandeln. Dieses physikalische Prinzip wird auf andere Weise, z. B. bei Schlagbohrmaschinen in der Mechanik, bereits angewandt.

[0037] Die Masse, die im ungestörten Strahl ($d_u = 3 \text{ mm}$ infolge Strahlkontraktion an der Düse) zwischen zwei Störstellen enthalten ist, beträgt:

$$m_u = \rho \cdot V_u = \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_u^2 \cdot L \quad (\rho \dots \text{Dichte, } V \dots \text{Volumen})$$

[0038] Die Masse in einem Klumpen ergibt sich aus der Differenz zwischen der Masse des ungestörten Strahls und der Masse des verbleibenden dünnen Strahls zwischen den Klumpen:

$$m_k = \rho \cdot V_k = \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_u^2 - d_s^2) \cdot L$$

[0039] Teilt man nun beide Massen, erhält man den Massenanteil im Klumpen:

$$\frac{m_k}{m_u} = \frac{d_u^2 - d_s^2}{d_u^2} = \frac{9-1}{9} = 89\%$$

[0040] Die Kraft F , die ein Strahl beim Aufprall auf ein Substrat ausübt, ist gleich der Impulsänderung des Strahls. Bei einem ungestörten Strahl ist die Geschwindigkeit konstant und somit auch die Aufprallkraft. Diese ist gleich dem Produkt aus Massenstrom mal Strahlgeschwindigkeit vordem Aufprall:

$$F_u = \frac{\delta m}{\delta t} \cdot u = \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot d_u^2 \cdot u^2 = 0,13 \text{ N}$$

[0041] Mit den Werten für den ungestörten Fall ergibt sich eine Kraft von 0,13 Newton. Für den instationären Fall wird der Impuls des Klumpens berechnet und die Zeit Δt , in der dieser Impuls an das Substrat abgegeben wird, abgeschätzt. Dies ist mit Hilfe der Dicke des Klumpens möglich. Dessen Dicke entspricht etwa dem Strahldurchmesser (ungestört), d. h. die Wechselwirkung erfolgt in einer Zeit von $\Delta t = d_u / u \approx 0,7 \text{ ms}$. Die Kraft des Klumpens F_k ergibt nach folgender Berechnung 2,76 Newton:

$$F_k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I - 0}{\Delta t} = \frac{m_k \cdot u}{\Delta t} = 2,76 \text{ N}$$

[0042] Dieser Wert ist 21-fach höher als beim ungestörten Strahl. Dabei wurden die der Berechnung zugrunde liegenden Versuche nicht mit dem Ziel durchgeführt, eine Maximierung des Impulssammelns zu erreichen.

[0043] Zur praktischen technischen Umsetzung sind unterschiedliche Ansätze geeignet. Die Umsetzung der Modulation der Düsenfläche ist technisch realisierbar, jedoch deutlich aufwändiger als die praktikablere Modulation des Drucks. Die Druckmodulation kann z. B. über eine Nockenwelle erreicht werden, die den Kompressionskolben einer Pumpe

gegen eine Feder bewegt. Die Formgebung der Nockenwelle ist dann entscheidend für den Druckverlauf. Andere Formen der Druckmodifikation sind ebenfalls vorgesehen.

[0044] Ziel der praktischen Anwendung des modifizierten Flüssigkeitsstrahls ist es vor allem, Verunreinigung von einem Substrat gegen die Haftkraft abzulösen. Mit kleinen Drücken, aber sehr definierter, zeitlicher Entwicklung der Geschwindigkeit aus der Düse soll ein Aufsammeln von Impuls in der Flüssigkeit, insbesondere im Wasser, erreicht werden, das beim Aufprall auf die Verunreinigung dadurch eine wesentlich höhere, stoßartige Kraft aufbringt, als ein kontinuierlicher Strahl gleicher Geschwindigkeit aufzubringen vermag.

[0045] Die technische Umsetzung muss periodisch ausgeführt werden. Die Periode wird bevorzugt so lang gewählt werden, dass der nachfolgende Aufprall eines Strahlabschnitts allein und unmittelbar auf die Zielfläche bzw. die dort vorhandene Verunreinigung trifft, nicht hingegen auf das noch ablaufende Wasser des vorherigen Aufpralls. Eine längere Periode erlaubt außerdem eine stärkere Impulssammlung und erhöht somit die Wirksamkeit des einzelnen Stoßes.

[0046] Es hat sich überraschend gezeigt, dass ein Aufsammeln eines Strahlimpulses über einer gegebenen Spritzdauer Δt , möglich ist. Um dies zu erreichen, muss eine stetige Zunahme der Strahlgeschwindigkeit erfolgen, damit später aus der Düse abgegebene Fluidelemente die vorher abgegebenen Fluidelemente einholen können.

[0047] Der Zeitpunkt t_k und Ort x_k , wann und wo dies geschieht, ist schematisch anhand eines Weg-Zeit Diagrammes erkennbar (vgl. Fig. 1). Dargestellt sind Ort-Zeit-Geraden für drei verschiedene Fluidelemente, die zu den Zeitpunkten t_0 , t_1 , t_2 die Düse verlassen haben. Erkennbar ist, dass sich diese Geraden an einem Punkt schneiden, bei x_k zum Zeitpunkt t_k . Unter Berücksichtigung der Erkenntnis, dass die Steigung dieser Geraden der Geschwindigkeit der Fluidelemente entspricht, wird deutlich, dass die Geschwindigkeit mit späterer Startzeit zunehmen muss, um einen Schnittpunkt, d. h. eine Vereinigung der Fluidelemente zu gewährleisten. Eine zeitlich veränderliche Geschwindigkeit ist nichts anderes als eine Beschleunigung. Beschleunigungen in der Größenordnung von 300 - 400 m/s² am Anfang des Spritzvorgangs haben sich dabei als besonders vorteilhaft erwiesen. Diese Beschleunigung mag sehr hoch erscheinen aber es handelt sich nur einen Momentanwert. Die typischen globalen Beschleunigungen liegen in der Größenordnung 150 m/s². Ein weiterer Grund für die hohen Werte ist die kleine Zeitskala, die für die Vorgänge zur Verfügung steht. Diese spielen sich in Hundertsteln von Sekunden ab.

[0048] An dieser Stelle wird eine weitere wichtige Regel sichtbar. Die Vereinigung von Fluidelementen darf nicht zu einer Kollision führen. Denn wenn ein sehr schnelles Fluidelement auf ein vorheriges, langsames Fluidelement treffen würde, hätte dies zur Folge, dass das bis zu diesem Zeitpunkt gesammelte Fluid zerbrochen wird und in Form kleiner Tropfen weiterfliegen würde. Die kleinen Tropfen verlieren Impuls an die umgebende Luft und verteilen sich über ein wesentlich größeres Volumen. Eine allzu große Beschleunigung ist also nicht erwünscht. Die Erfahrung zeigt, dass eine globale Beschleunigung um 200 m/s² noch sinnvoll ist. Diese globale Beschleunigung a ist definiert als die Differenz der Maximalgeschwindigkeit beim Spritzvorgang minus der Geschwindigkeit am Anfang des Spritzvorgangs, geteilt durch die Zeit der Geschwindigkeitszunahme.

[0049] Es hat sich mithin als bedeutsam herausgestellt, dass ein Aufbrechen des zuvor gesammelten Fluids verhindert werden muss. Zum einen hält die Oberflächenspannung σ eine Flüssigkeit zusammen, d. h. es gibt eine kritische Weberzahl, das Verhältnis von Trägheitskraft zur Oberflächenkraft, von der an eine Vereinigung der Fluidelemente nicht mehr möglich ist und es zum Auseinanderbrechen und Zerbersten des angesammelten Fluids kommt. Da es bisher keine wissenschaftlichen Erkenntnisse gibt, um diese Frage bei Strahlen (Fluidelementen) zu beantworten, können die Ergebnisse bei einem sehr ähnlichen, aber umgekehrten Phänomen herangezogen werden. Bei der Kollision von Tropfen des Durchmessers d mit einer Relativgeschwindigkeit u_{rel} liegt nach Nobari und Tryggvason die kritische Weberzahl bei 24 für eine Vereinigung der Tropfen.

$$We = \rho u_{rel}^2 d / \sigma$$

(Dichte ρ und Oberflächenspannung σ des Fluids). Die Weber-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl der Strömungsmechanik. Sie beschreibt das Verhältnis von Trägheitskraft zur stabilisierenden Oberflächenkraft bei Zweiphasenströmungen, zum Beispiel eines Wassertropfens in Luft.

[0050] Wenn die kritische Weberzahl We überschritten wird, so findet nur für eine kurze Zeit eine Vereinigung (coalescence) der Tropfen statt. Die vereinigte Flüssigkeit zerfällt im weiteren Verlauf in kleinere Fragmente. Der Grund hierfür liegt in der zu großen kinetischen Energie der Kollision. Bei Kollisionsenergien, die kleiner sind als die kritische Weberzahl, ermöglicht die Oberflächenspannung als Rückstellkraft mit der Trägheitskraft Tropfenschwingungen als Ergebnis des Zusammenpralls.

[0051] Fig. 2 zeigt die Trennlinie zwischen dauerndem Zusammenhalt (permanent coalescence) und nur temporärem Zusammenhalt zwischen kollidierenden Tropfen gleicher Größe, aus M. R. Nobari and Y.-J. Jan G. Tryggvason, Head-on collision of drops-A numerical investigation, Physics of Fluids 8(1), pp. 29-42, 1996.

[0052] Fig. 3 zeigt Ergebnisse zur Trennlinie zwischen Separation und Zusammenhalt zwischen kollidierenden Tropfen

gleicher Größe, nach M.D. Saroka, N. Ashgriz and M. Movassat, Numerical Investigation of Head-on Binary Drop Collisions in a Dynamically Inert Environment, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 1, pp. 23-37, 2012.

[0053] Im Laufe der Zeit wird auf Grund der Zähigkeit die überschüssige Energie der Vereinigung dissipiert bzw. vernichtet, die Schwingungen klingen ab. Weiterhin führt die Zähigkeit dazu, dass bei kleiner Reynoldszahl es stets zu einem Zusammenfinden der Fluidelemente kommt. Wird die maximale Relativgeschwindigkeit errechnet, die zwischen Fluidelementen, den Tropfen, auftreten kann, ehe es zum Strahlaufbruch kommt, so wird bei Wasser der Einfluss der Weberzahl überwiegen. Denn bei einem Strahl mit 1 mm Durchmesser wäre die maximale Relativgeschwindigkeit ca. 0,8 m/s auf Grund der Reynoldszahl < 800 , d. h. durch Dissipation der Wechselwirkungsenergie. Wogegen nach der Bedingung von Saroka Ashgriz $We < 34$, d. h. Effekt der Oberflächenspannung bei einem Wasserstrahl mit 1 mm Durchmesser eine maximale Relativgeschwindigkeit Δv von ca. 1,6 m/s ergeben würde. Diese Zahlen basieren aber auf Ergebnissen für den Zusammenprall von Tropfen. Werden die Ergebnisse für Messungen an Schützenfischen [P. Gerullis and St. Schuster, Archerfish Actively Control the Hydrodynamics of Their Jets, Current Biology 24, pp. 2156-2160, 2014] für die Geschwindigkeit der Strahlspitze betrachtet, v_{tip} :

$$v_{tip} = v_{max} - \Delta v \exp(-t/\tau)$$

so liegt hier der Wert für die Relativgeschwindigkeit um einen Faktor 1,7 bis 2,7 höher (2,7 - 3,8 m/s). Die angegeben exponentielle Funktion stellt ein Beispiel dar, weitere Funktionen kommen in Betracht (z. B. quadratische). Es kommt grundsätzlich jede monoton fallende Funktion in Betracht, so dass die allgemeine Formel

$$v_{tip} = v_{max} - \Delta v f(t)$$

lautet.

[0054] Die typische Zeitskala τ , in der die Vereinigungsvorgänge erfolgen, liegt bei nach dem Vorbild des Schützenfischs im Bereich von 6 bis 20 ms und die maximale Geschwindigkeit v_{max} bei ca. 20 - 25 m/s. Die maximale Relativgeschwindigkeit Δv beträgt 3 m/s, weil von dieser Relativgeschwindigkeit an die Zerstäubung der angesammelten Flüssigkeit einsetzt. Diese beiden Werte liefern eine relative Geschwindigkeitsmodulation ε nach der Formel

$$\varepsilon = \Delta v / v_{max}$$

wobei die relative Geschwindigkeitsmodulation ε bei maximal 0,66 liegt. Dies entspricht in etwa einer Verdoppelung der Anfangsgeschwindigkeit.

[0055] Basierend auf diesen Überlegungen konnte eine Abschätzung der Parameterbereiche für eine Reinigung nach dem erfindungsgemäßen Prinzip erfolgen. Je nach Entfernung zwischen der Düse und der zu reinigenden Fläche, der Zielfläche, liegt die Dauer der Einspritzung zwischen wenigen Millisekunden und einigen Zehntelsekunden. Die Geschwindigkeitszunahme erfolgt in dieser Zeit mit einem Faktor bis zu 3 - 4. Die maximale Geschwindigkeit der Flüssigkeit kann bis zu 20 m/s erreichen, jedoch muss damit gerechnet werden, dass in diesem Falle oder bei Überschreitung der maximalen Geschwindigkeit nicht ein einziges zusammenhängendes Flüssigkeitsvolumen das Ziel trifft und stattdessen mehrere Tropfen in einem kleinen engen Raumbereich innerhalb kurzer Zeit die zu reinigende Fläche treffen. Es wurde jedoch festgestellt, dass eine ähnliche Wirkung erzielt wird wie mit einem einzigen Tropfen. Entscheidend für das Wirkprinzip ist die Konzentration der Flüssigkeit auf ein kleines Volumen und deshalb auch für eine kurzzeitige, d. h. impulsartige Kraftwirkung auf das Ziel.

[0056] Es gibt eine weitere Begrenzung der Fluidgeschwindigkeit, nämlich die aerodynamische Weberzahl für Tropfenaufbruch:

$$We_{aero} = \rho_{gas} u_{rel}^2 d / \sigma,$$

[0057] Hier spielen die aerodynamischen Kräfte auf die Flüssigkeit eine Rolle. Der wesentliche Unterschied zur normalen Weberzahl ist, dass hier die Dichte des umgebenden Gases und die Relativgeschwindigkeit zum Gas wirksam werden. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zum Gas verliert der Tropfen seine Kugelform und wird abgeplattet. Ab einer aerodynamischen Weberzahl von ca. 20 entsteht eine abgeflachte Tasche, die aufgebläht wird und aufbricht. Eine Abschätzung dieser Relativgeschwindigkeit für Wassertropfen in Luft liefert einen Wert von 35 m/s für Tropfen von 1 mm in Durchmesser, für Tropfen mit 5 mm liegt der Wert bei 16 m/s. Dies bedeutet, dass Wasserstrahlen mit zuneh-

mender Geschwindigkeit auch von der Luft destabilisiert werden. Mit zunehmender Entfernung zwischen Düse und Ziel wird dieser Effekt wirksam. Deshalb zeigte es sich, dass die Strahlen Geschwindigkeiten von ca. 25 m/s nicht überschreiten sollten. Dies entspräche einem treibenden verlustfreien Differenzdruck von ca. 3 bar.

[0058] Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn der Flüssigkeitsstrahl mittels einer Kolbenpumpe erzeugt wird und die stetige Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse durch eine zumindest zeitabhängige Steuerung der Kolbenpumpe und der Kolbenbewegung hervorgerufen wird. Alternativ hierzu oder als ergänzende Maßnahme wird die stetige Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse durch eine entsprechende Steuerung eines Düsenquerschnitts und/ oder einer Düsenöffnung hervorgerufen.

[0059] Die besonderen Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens liegen darin, dass mit einer sehr harten Pulsation durch einen "Wasserkumpen" der gesammelte Impuls erreicht werden kann. Damit werden bis zu 60-fach größere Kraftspitzen auf den zu reinigenden Oberflächen gegenüber konventionellen Spritzdüsen erzeugt und damit Einsparpotentiale von 50 % an Reinigungszeit und Reinigungsmittelverbrauch je nach Verschmutzungscharakteristik erwartet. Die Kraftverstärkung liegt auch weit über denen herkömmliche pulsierender Flüssigkeitsstrahlen. Dies wird durch die spezielle Modulation der Spritzstrahlen erreicht.

[0060] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die Sammlung von Strahlimpuls während der Phase der Strahlbildung und -ausbreitung. Bei der anschließenden kurzen Wechselwirkung des Strahls mit der Zielfläche, z. B. einem Substrat oder einer Verschmutzung, entstehen signifikant höhere Kräfte, welche beim Strahlaufprall für die Reinigung zur Verfügung stehen und die Verschmutzung wesentlich stärker schädigen. Der Ansatz unterscheidet sich somit grundsätzlich von bisher bekannten Wirkprinzipien pulsierender Strahlen. Dieser Unterschied lässt sich gut mit dem Vergleich von Schlagbohrmaschine und Bohrhammer erklären: bei beiden werden pulsartige Stöße auf das Werkstück ausgeübt. Dabei wird der Schlagbolzen beim Bohrhammer jedoch über eine wesentlich längere Zeit beschleunigt, bevor er den Meißel trifft. Dies bedeutet, dass entsprechend mehr Impuls im Schlagbolzen gesammelt wird, wodurch der Bohrhammer wesentlich größere Kraftspitzen erzielt - vergleichbar zu dem erfindungsgemäßen modifizierten Flüssigkeitsstrahl. Dem hingegen zeigen die bisher forschungsseitig bekannten, pulsierenden Strahlen eng aufeinanderfolgende Unterbrechungen des Strahls - vergleichbar mit der weniger effektiven Schlagbohrmaschine.

[0061] Ein weiterer Aspekt betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Abschnitten eines Flüssigkeitsstrahls, wobei ein einzelner Strahlabschnitt des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche eine in Bewegungsrichtung geringere Länge hat als nach dem Austritt aus einer Düse. Die Vorrichtung umfasst die Düse und eine mit der Düse fluidtechnisch verbundene Einrichtung zur Druckerzeugung in der Flüssigkeit. Nach der Erfindung ist es vorgesehen, dass die Einrichtung zur Druckerzeugung einer Flüssigkeit eine gesteuerte Kolbenpumpe, ausgeführt zur zumindest zeitabhängigen Ansteuerung einer Kolbenbewegung, umfasst. Alternativ oder ergänzend dazu weist die Düse einen steuerbaren Düsenquerschnitt und/ oder eine steuerbare Düsenöffnung auf.

[0062] Es hat sich weiterhin als vorteilhaft erwiesen, wenn eine manuelle oder roboterbasierte Reinigung mittels einer Düse erfolgt, deren Ausrichtung veränderbar ist, so dass sich die Strahlrichtung einstellen lässt. Eine hierzu geeignete Vorrichtung kann z. B. als eine Düsenlanze ausgeführt sein.

[0063] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft die Verwendung des modifizierten Flüssigkeitsstrahls als Reinigungsstrahl. Dabei ist eine Verwendung zur Spritzreinigung industrieller Bauteile vorgesehen. Ebenso ist es vorgesehen, den modifizierten Flüssigkeitsstrahl als Reinigungsstrahl für eine Behälterreinigung oder Tankreinigung mit einem Zielstrahlreiniger einzusetzen. Auch eine Spritzreinigung offener Oberflächen industrieller Geräte und Anlagen oder von Oberflächen von Industriefußböden, Geh- und Fahrwegen, Terrassenböden oder Fassaden ist vorgesehen. Neben den Anwendungen zur Reinigung sind auch eine Oberflächenbearbeitung oder ein Schneidvorgang vorgesehen. Ebenso sind Anwendungen in den Bereichen Steinbearbeitung, wie Tunnel-, Bergbau, Feuerlöschtechnik oder Polizeitechnik vorgesehen.

[0064] Das erfindungsgemäße Verfahren verspricht eine bisher unerreichte mechanische Reinigungswirkung auch bei großen Düsenabständen und niedrigem Betriebsdruck. Die Reinigung der Objekte erfolgt schonend, denn die hohen Kraftspitzen wirken nur über eine kurze Zeit, im Gegensatz zur Reinigung mit einem Strahl unter hohem Druck, bei der dauerhaft hohe Kräfte wirken. Zusätzlich werden gegenüber bekannten Systemen Ressourcen wie Zeit, Wasser, chemische Zusätze und Energie in hohem Maße gespart.

[0065] Der Bedarf an relevanten Spritzreinigungsanlagen im Bereich der industriellen Teilereinigung ist enorm, müssen doch fast alle Bauteile vor jedem weiteren Bearbeitungsschritt oder bei Endauslieferung gemäß den prozessbedingten Sauberkeitsanforderungen gereinigt werden. Die nasschemischen Verfahren nehmen dabei einen Marktanteil von 60 % ein, wobei hier wiederum die Spritzreinigung bei mehr als der Hälfte der Unternehmen Verwendung findet. Die Verkürzung von Taktzeiten ist bei Einhaltung der geforderten Bauteilsauberkeit direkt mit einer höheren Ausbringung und somit der Steigerung der Produktivität einer Anlage bzw. einer ganzen Fertigungslinie verbunden. Eine große Zahl von Unternehmen überwachen die Durchlaufzeiten als Optimierungskriterium. Des Weiteren beziffern viele Unternehmen den Anteil der Reinigungskosten auf durchschnittlich ca. 10 % am Gesamtherstellungsprozess von Bauteilen, wodurch das große Einsparpotenzial im Bereich Reinigung sichtbar wird.

[0066] Die Prozesse beider industrieller Anwendungen können in der Regel der Massenfertigung zugeordnet werden,

wodurch die Verkürzung von Taktzeiten bei der Teilereinigung bzw. Stillstandszeiten bei der Reinigung von Verarbeitungsanlagen insbesondere in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie direkt mit der höheren Ausbringung und somit Steigerung der Produktivität einer Anlage verbunden ist. Damit wird zugleich die angestrebte Entkoppelung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch, die von wesentlicher Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit ganzer Volkswirtschaften sein wird, unterstützt.

[0067] Die im Rahmen der vorliegenden Erfindung erarbeiteten Aussagen zur Wirkweise und industriellen Anwendbarkeit dieser Technologie stellen eine Neuerung auf technischem Gebiet dar, woraus sich zugleich die gewerbliche Anwendbarkeit ergibt. Die gesellschaftliche Relevanz dieser Innovation liegt vornehmlich im Beitrag zur Ressourcenschonung (Reduzierung von Zeit, Wasser, chemische Zusätze und Energie), der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit sowie der Erhöhung der Verbrauchersicherheit durch gründlicher gereinigte Lebensmittelanlagen.

[0068] Folgende Figuren sind bereits in der vorstehenden Beschreibung erwähnt worden. Sie zeigen Diagramme.

Fig. 1: Weg-Zeit-Diagramm, das beispielhaft drei diskrete Abschnitte des bis zum Zeitpunkt t_k und zum Ort x_k strömenden Strahlabchnitts zeigt;

Fig. 2: die Trennlinie zwischen dauerndem Zusammenhalt (permanent coalescence) und nur temporärem Zusammenhalt zwischen kollidierenden Tropfen gleicher Größe; und

Fig. 3: Ergebnisse zur Trennlinie zwischen dauerndem Zusammenhalt (permanent coalescence) und nur temporärem Zusammenhalt zwischen kollidierenden Tropfen gleicher Größe.

[0069] Anhand der Beschreibung von Ausführungsbeispielen und ihrer Darstellung in der zugehörigen Zeichnungen wird die Erfindung nachfolgend näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 11: schematisch eine Darstellung von Düse und Zielfläche sowie den dazwischen ausgebildeten Strahlab schnitten;

Fig. 12 bis 14: Düsen nach dem Stand der Technik;

Fig. 15: schematisch eine Darstellung der Austrittsgeschwindigkeit des Strahls mit Bildung von Wasserkumpen; und

Fig. 16: schematisch eine Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Strahlab schnitten eines diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls.

[0070] Fig. 11 zeigt schematisch eine Darstellung von Düse und Zielfläche sowie den dazwischen ausgebildeten Strahlab schnitten, wie sie durch eine Pulsation gemäß der vorliegenden Erfindung erzeugt wird. Dies geht bei der hier dargestellten Verwendung für einen Reinigungsstrahl mit einer erheblichen Eskalation der Reinigungswirkung einher. Dabei wird über die gesamte Strahllänge der Impuls gesammelt und in einem sehr kurzen Stoß mit enormer Kraft direkt auf der zu reinigenden Oberfläche entladen.

[0071] Zusätzlich steigen infolge der sehr kurzen, impulssammelnden Stöße die Spritzpausen auf der Oberfläche gegenüber der herkömmlichen Pulsation (vgl. Fig. 4), wodurch der dämpfende Flüssigkeitsfilm vollständig ablaufen kann und die Strahlkraft direkt auf die Verschmutzung auf der Zielfläche wirkt. Durch die genannten Effekte wird die Verschmutzung um ein Vielfaches stärker und in nachhaltiger Weise zerstört, wodurch die Reinigungs- bzw. Taktzeiten sinken oder die Reinigungsmittelkonzentration und -temperatur bei gleichem Reinigungsergebnis verringert werden können.

[0072] Ein Diagramm 30 zeigt den Druckverlauf über der Zeit. Der Stoßdruck $p_{\text{stoß}}$ beträgt ein Vielfaches des Staudrucks p_{stau} . Bei den Figuren 11 bis 14 ist jeweils der zeitliche Verlauf des durch den Spritzstrahl auf der zu reinigenden Oberfläche aufgetragenen Strahldrucks abgebildet, welcher integriert über den Strahlquerschnitt dem Kraftverlauf entspricht.

[0073] Fig. 12 zeigt schematisch eine Darstellung eines herkömmlichen kontinuierlichen Reinigungsstrahls ohne Pulsation nach dem Stand der Technik, einschließlich eines Diagramms 31, das den stetig gleichen Staudruck p_{stau} erkennen lässt. Beim kontinuierlichen Betrieb stellt sich nach dem Einschalten der Düse ein konstanter Staudruck ein.

[0074] Fig. 13 zeigt schematisch eine Darstellung eines herkömmlichen Reinigungsstrahls mit Strahlunterbrechern nach dem Stand der Technik, einschließlich eines erklärenden Diagramms 32, das übereinstimmende Höhen von Staudruck p_{stau} und Stoßdruck $p_{\text{stoß}}$ zeigt. Bis auf die Unterbrechungen des Druckverlaufs stellt sich bei Düsen mit Strahlunterbrechern ein ähnlicher Strahldruckverlauf zum kontinuierlichen Fall ein.

[0075] Reinigungsvorteile sind hierbei durch zwei Effekte zu erwarten. Zum einen wird die Verschmutzung stärker beeinträchtigt, wenn infolge der Strahlunterbrechungen sich der den Spritzstrahl dämpfende Flüssigkeitsfilm nicht vollständig auf der zu reinigenden Oberfläche ausbilden kann. Zum anderen wird im Allgemeinen die Reinigungsflüssigkeit das Bauteil wesentlich turbulenter umströmen. Da die Strahlunterbrechung aber auch mit einem Impulsverlust auf der Oberfläche über der Zeit verbunden ist, kann damit gerechnet werden, dass keine signifikant verbesserte Reinigungswirkung entsteht.

[0076] Fig. 14 zeigt schematisch eine Darstellung einer Düse im pulsierenden Betrieb nach dem Stand der Technik,

einschließlich eines erklärenden Diagramms 33 zum Verhältnis der Höhen des Staudrucks p_{stau} und des Stoßdrucks $p_{\text{stoß}}$. Dabei wird beim Einschalten der Düse im pulsierenden Betrieb, z. B. realisiert durch Ventilschaltungen, kein konstanter, dem Staudruck entsprechender Strahldruck auf der Oberfläche erreicht. Vielmehr treffen in kurzer Abfolge Stoßwellen auf die Oberfläche, welche in ihrer Folge höhere Druckspitzen gegenüber dem Staudruck erzeugen. Zusätzlich treten nur die positiven der bei den Strahlunterbrechern (vgl. Fig. 3) vorhandenen Nebeneffekte des sich nicht voll ausbildenden dämpfenden Flüssigkeitsfilms mit hoher Turbulenz auf, da im dargestellten Fall kein Impulsverlust über der Zeit auftritt.

[0077] Fig. 15 zeigt, wie die Austrittsgeschwindigkeit des Strahls stetig zunehmen muss, um eine abrupte Flüssigkeitsansammlung an der Spitze des Strahls zu erreichen. Dies konnte bei der dargestellten Ausführungsform mit einem Linearmotor erreicht werden. Die Ansammlung wurde durch einen Shaker erreicht, mit dem ein poröser Kolben mit 60 Hz angetrieben wurde. Die relative Anregungsamplitude beträgt in den Abbildungen a) bis g) (von links nach rechts) 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6. Die Düse (Düsendurchmesser 3,2 mm, Grundgeschwindigkeit $u = 4,29 \text{ m/s}$) ist im oberen Bildbereich jeder Abbildung angedeutet. Die Abbildungen zeigen die Bildung von Wasserklumpen und den Strahl, der zwischen diesen Klumpen deutlich dünner ist. Dies wird an der Dicke d und Länge L des Strahls zwischen den Ansammlungen deutlich ($d_s = 1 \text{ mm}$; $L = 71,5 \text{ mm}$; rechts). In einer weiteren Ausführungsform soll die Modulation so weit getrieben werden, dass der Strahl komplett abreißt und sich einzelne, kurz nacheinander auftreffende Wasserklumpen bilden, damit das Wasser bereits abgelaufen ist, ehe ein neuer Wasserklumpen auftrifft. Dadurch wird stets unmittelbar die Oberfläche, die Zielfläche, getroffen, was die Effektivität weiter verbessert.

[0078] Diese Form des Impulssammelns aus der rechten Abbildung g) ist bereits bei 120 mm abgeschlossen. Durch eine Vergrößerung des Abstandes von der Düse können längere Integrationszeiten erreicht werden. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, mehr Zeit einzuplanen, je weiter entfernt das Ziel ist (bis zu 70 ms bei einem Abstand von 600 mm). Dies entspräche einer Frequenz von 14 Hertz. Die Impulsaufsammlung sowie die resultierende Kraft sind hier noch einmal bis zu einem Vierfachen größer.

[0079] An der rechten Abbildung g) wird deutlich, dass die Klumpen auch die Form eines breiten, flachen Zylinders haben können. Diese Form ist möglicherweise für die Reinigung sehr interessant, da eine größere Fläche gleichzeitig abgedeckt wird. In diesem Fall beträgt der Durchmesser des Klumpens etwa das Zehnfache des ungestörten Strahldurchmessers. Da bei Vergrößerung des Durchmessers sich jedoch der auf die verschmutzte Oberfläche aufgebrachte Strahldruck (Impact) reduziert, ist eine für die Reinigung optimale Klumpenform zu ermitteln und zu erzeugen.

[0080] Fig. 16 zeigt schematisch eine Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 zur Erzeugung einer Folge von Strahlabschnitten eines diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls, der hier nicht dargestellt, aber durch eine entsprechende Stellung einer Düsenlanze 112 mit der Düse 110 auf die Zielfläche 26 ausgerichtet ist. Die Verstellung der Düsenlanze 112 in Pfeilrichtung wird durch einen Schwenkantrieb 114 ermöglicht, der auch ein Gelenk umfasst.

[0081] Die Vorrichtung 100 umfasst weiterhin eine Kolbenpumpe 116, in der sich ein Kolben 118 bewegt und den Druck der Flüssigkeit, aus der der Flüssigkeitsstrahl erzeugt wird, hervorruft. Der Kolben 118 ist über seine Kolbenstange mit einem Kolbenantrieb 120 verbunden, der in der hier dargestellten bevorzugten Ausführungsform als ein Linearantrieb ausgeführt ist.

[0082] Um den erfindungsgemäß vorgesehenen Druckverlauf zu erreichen, ist eine Steuerung 122 vorgesehen, die den Kolbenantrieb 120 steuert und hierzu mit dem Kolbenantrieb 120 steuerungstechnisch verbunden ist. Eine solche steuerungstechnische Verbindung besteht ebenfalls zu dem Schwenkantrieb 114 und zu einem Dosierventil 126. Das Dosierventil 126 dosiert für jede Periode eine vorgesehene Flüssigkeitsmenge aus einem Flüssigkeitsreservoir 124, um einen modifizierten Flüssigkeitsstrahl mit den gewünschten Eigenschaften erzeugen zu können.

[0083] Anstelle einer einzelnen Düse 110 sehen alternative Ausgestaltungen der vorgeschlagenen Lösung auch mehrere Austrittsorte an der Düsenlanze 112 vor. Diese weiteren Düsen 110 können zudem einzeln steuerbar ausgestaltet sein, so dass auch ohne Bewegung der Düsenlanze 112 unterschiedliche Orte gleichzeitig oder nacheinander behandelt werden können.

[0084] Der erfindungsgemäße Verfahrensablauf startet in seiner bevorzugten Ausgestaltung mit der Dosierung der Flüssigkeitsmenge in die Kolbenpumpe 116. Danach wird mittels des Schwenkantriebs 114 die Düse 110 in die gewünschte Ausrichtung gegenüber der Zielfläche 26 gebracht. Danach wird der Kolbenantrieb 120 so gesteuert, dass aus der Düse 110 der modifizierte Flüssigkeitsstrahl mit den gewünschten Eigenschaften austritt und als Klumpen auf die Zielfläche 26 auftrifft.

Bezugszeichenliste

[0085]

10, 110 Düse
12 Strahl (kontinuierlich)

	14	Strahl (unterbrochen)
	16	Strahl (herkömmliche Pulsation)
	20	Strahl (Hammerpulsation)
	21	Strahlabschnitt
5	22	Wasserkumpen
	26	Zielfläche
	28	Bewegungsrichtung
	30 - 33	Diagramme
	41	Bereich dauernden Zusammenhalts
10	42	Bereich temporären Zusammenhalts
	43	Bereich der Separation
	44	Bereich des Zusammenhalts
	100	Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Strahlabschnitten
	112	Düsenlanze
15	114	Schwenkantrieb
	116	Kolbenpumpe
	118	Kolben
	120	Kolbenantrieb
	122	Steuerung
20	124	Flüssigkeitsreservoir
	126	Dosierventil

Patentansprüche

- 25
1. Verfahren zur Erzeugung einer Folge von Strahlabschnitten (21) eines diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20), wobei ein einzelner Strahlabschnitt (21) des Flüssigkeitsstrahls (20) eine solche Modifikation erfährt, dass er vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche (26) eine in Bewegungsrichtung (28) geringere Länge (L_f) hat als nach dem Austritt aus einer Düse (10), **dadurch gekennzeichnet, dass** die Modifikation durch unterschiedliche
- 30 Geschwindigkeiten innerhalb des einzelnen Strahlabschnitts (21) des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20) in der Weise hervorgerufen wird, dass infolge einer stetigen Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse (10) ein in Bewegungsrichtung (28) hinterer Strahlbereich einen vorderen Strahlbereich des Strahlabschnitts (21) einholt, indem der einzelne Strahlabschnitt (21) mit zunehmender Geschwindigkeit aus der
- 35 Düse (10) austritt, je später er aus der Düse (10) austritt, und wobei ein Aufbrechen der zuvor zu dem Strahlabschnitt (21) vereinigten Flüssigkeit verhindert wird, indem ein kritisches Verhältnis von Trägheitskraft zu Oberflächenkraft nicht überschritten wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei n Strahlbereiche eines Strahlabschnitts (21) zu den Zeitpunkten t_0 bis t_n aus der Düse (10) austreten und zu einem Zeitpunkt t_k an einem Ort x_k auftreffen, wobei sich eine Geschwindigkeit einer
- 40 Strahlspitze v_{tip} aus einer Zeitskala τ , in der ein Vereinigungsvorgang am Ort x_k erfolgt, einer maximalen Geschwindigkeit v_{max} und einer Relativgeschwindigkeit Δv nach der Formel

$$v_{tip} = v_{max} - \Delta v f(t)$$

45 ergibt; wobei sich eine relative Geschwindigkeitsmodulation ε nach der Formel

$$\varepsilon = \Delta v / v_{max}$$

50 ergibt; wobei sich eine Weberzahl We aus einer Dichte ρ , einem Tropfendurchmesser d , einer Relativgeschwindigkeit u_{rel} und einer Oberflächenspannung σ aus der Formel

$$55 \quad We = \rho u_{rel}^2 d / \sigma$$

ergibt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der einzelne Strahlabschnitt (21), der mit zunehmender Geschwindigkeit aus der Düse (10) austritt, eine globale Beschleunigung a erfährt, die Differenz der Maximalgeschwindigkeit beim Spritzvorgang minus der Geschwindigkeit am Anfang geteilt durch die Zeitskala τ der Geschwindigkeitszunahme bis zu einer Größenordnung von 300 - 400 m/s² erreicht, wobei die typische Zeitskala τ , in der die Vereinigungsvorgänge erfolgen, im Bereich von 6 bis 20 ms liegt, wobei die maximale Geschwindigkeit $v_{\max}$ bei 20 m/s liegt, wobei die maximale Relativgeschwindigkeit Δv 3 m/s beträgt, wobei die relative Geschwindigkeitsmodulation ε bei maximal 0,66 liegt.
4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die globale Beschleunigung a um 200 m/s² liegt, wobei die Geschwindigkeitszunahme in dieser Zeit um einen Faktor bis zu 3 - 4 erfolgt, wobei die maximale Geschwindigkeit bis zu 20 m/s erreicht, wobei der einzelne Strahlabschnitt eine Geschwindigkeit von etwa 25 m/s nicht überschreitet, was einem treibenden verlustfreien Differenzdruck von etwa 3 bar entspricht.
5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Folge von Strahlabschnitten (21) periodisch erzeugt wird, wobei die Periode so lang ist, dass der nachfolgende Strahlabschnitt (21) allein und unmittelbar auf die Zielfläche (26) trifft, nicht hingegen auf noch ablaufende Flüssigkeit des vorherigen Strahlabschnitts (21).
6. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei der Flüssigkeitsstrahl (20) mittels einer Kolbenpumpe erzeugt wird und die stetige Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse (10) durch eine zumindest zeitabhängige Steuerung der Kolbenpumpe und der Kolbenbewegung hervorgerufen wird.
7. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die stetige Zunahme der Strahlgeschwindigkeit beim Austritt aus der Düse (10) durch eine entsprechende Steuerung eines Düsenquerschnitts und/ oder einer Düsenöffnung hervorgerufen wird.
8. Vorrichtung zur Erzeugung einer Folge von Abschnitten eines Flüssigkeitsstrahls (20), umfassend eine Düse (10) und eine mit der Düse (10) fluidtechnisch verbundene Einrichtung zur Druckerzeugung in der Flüssigkeit, wobei ein einzelner Strahlabschnitt (21) des diskontinuierlichen, modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20) vor dem Auftreffen auf einer Zielfläche (26) eine in Bewegungsrichtung (28) geringere Länge (L_f) hat als nach dem Austritt aus der Düse (10), **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einrichtung zur Druckerzeugung einer Flüssigkeit eine gesteuerte Kolbenpumpe, ausgeführt zur zumindest zeitabhängigen Ansteuerung einer Kolbenbewegung, umfasst und/ oder die Düse (10) einen steuerbaren Düsenquerschnitt oder eine steuerbare Düsenöffnung aufweist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei eine Düse (10) mit veränderbarer Ausrichtung zur manuellen oder roboterbasierten Reinigung vorgesehen ist.
10. Verwendung des modifizierten Flüssigkeitsstrahls (20), erhältlich nach einem Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 7, als Reinigungsstrahl.
11. Verwendung nach Anspruch 10, wobei eine Spritzreinigung industrieller Bauteile vorgesehen ist.
12. Verwendung nach Anspruch 10, wobei eine Behälterreinigung oder Tankreinigung mit einem Zielstrahlreiniger oder eine Spritzreinigung offener Oberflächen industrieller Geräte und Anlagen oder von Oberflächen von Industriefußböden, Geh- und Fahrwegen, Terrassenböden oder Fassaden vorgesehen sind.
13. Verwendung nach Anspruch 10, wobei eine Oberflächenbearbeitung oder ein Schneidvorgang vorgesehen sind.

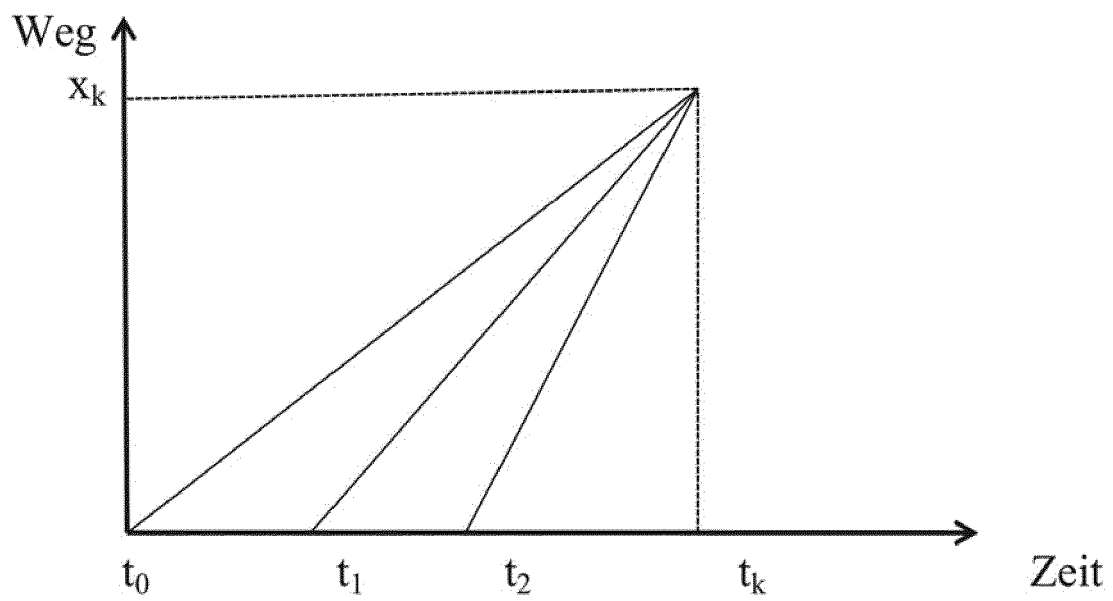


Fig. 1

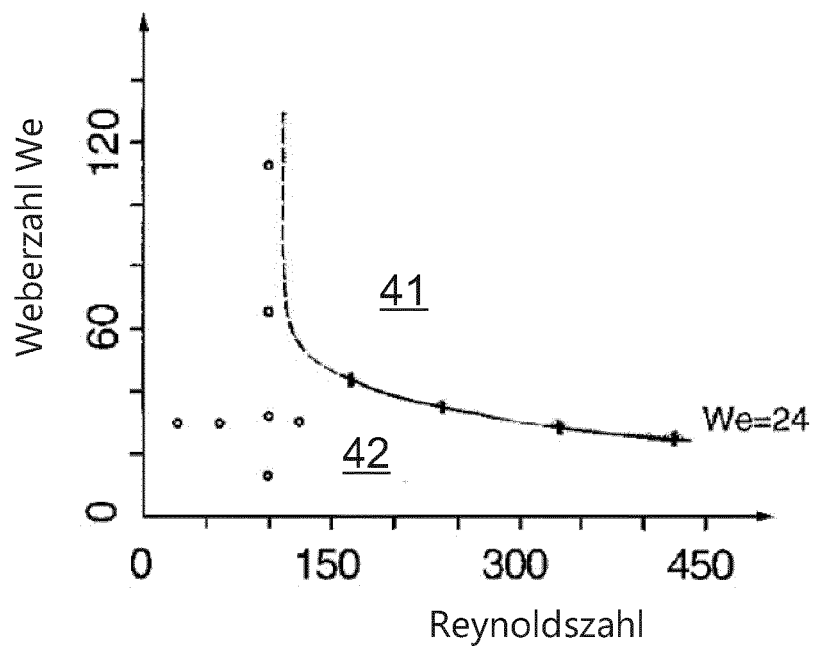


Fig. 2

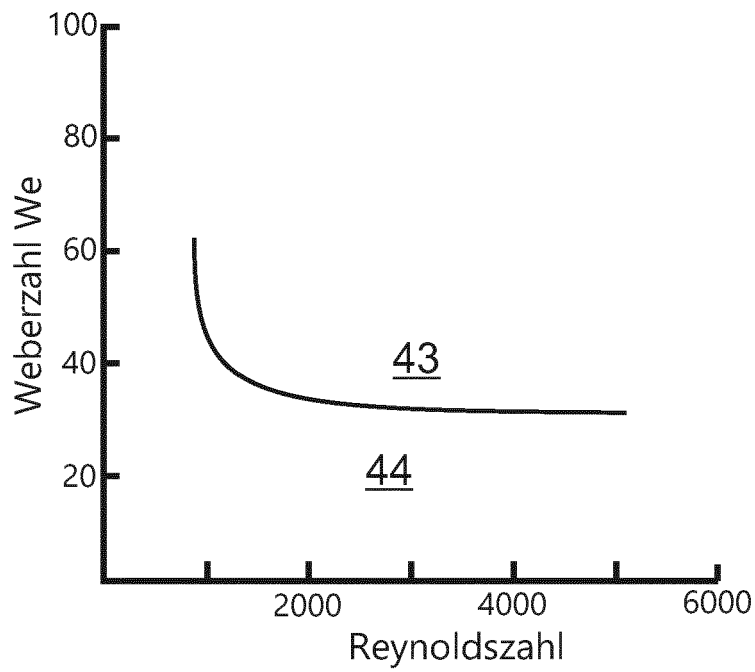


Fig. 3

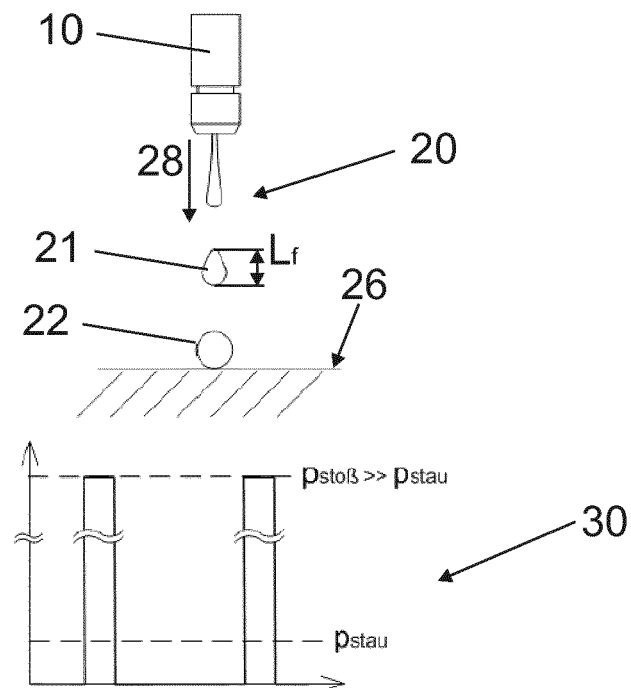


Fig. 11

Stand der Technik /
Prior Art

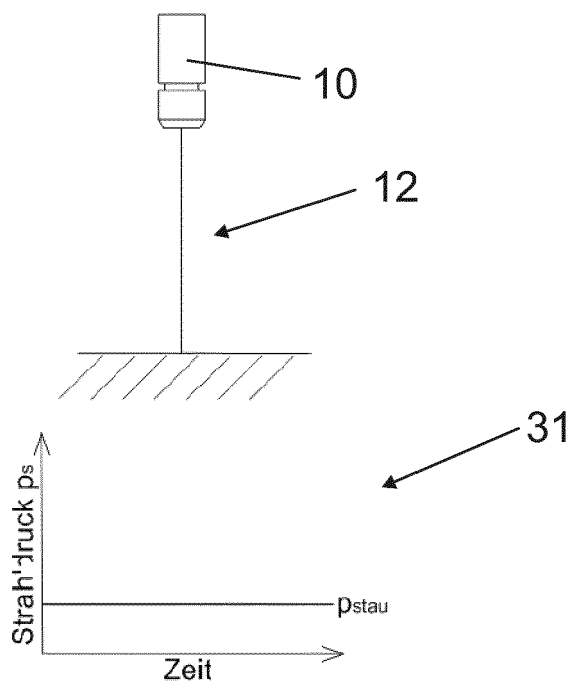


Fig. 12

Stand der Technik /
Prior Art

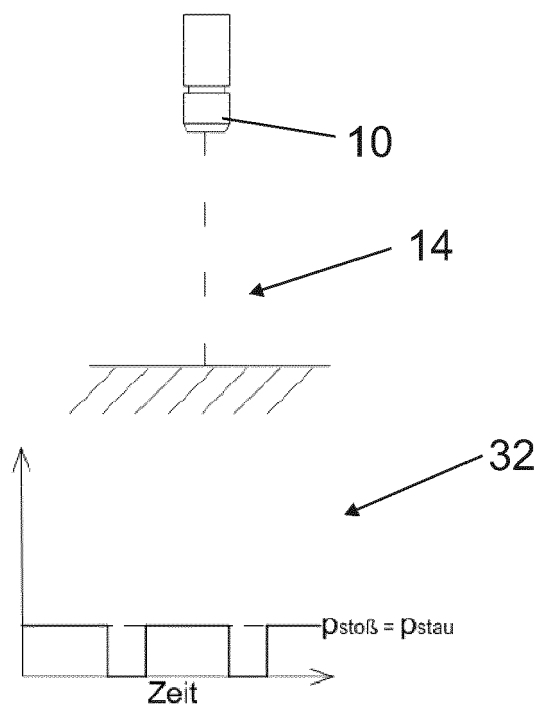


Fig. 13

Stand der Technik /
Prior Art

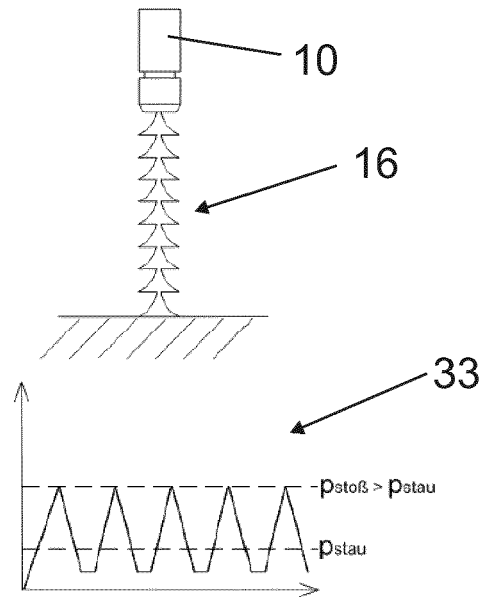


Fig. 14

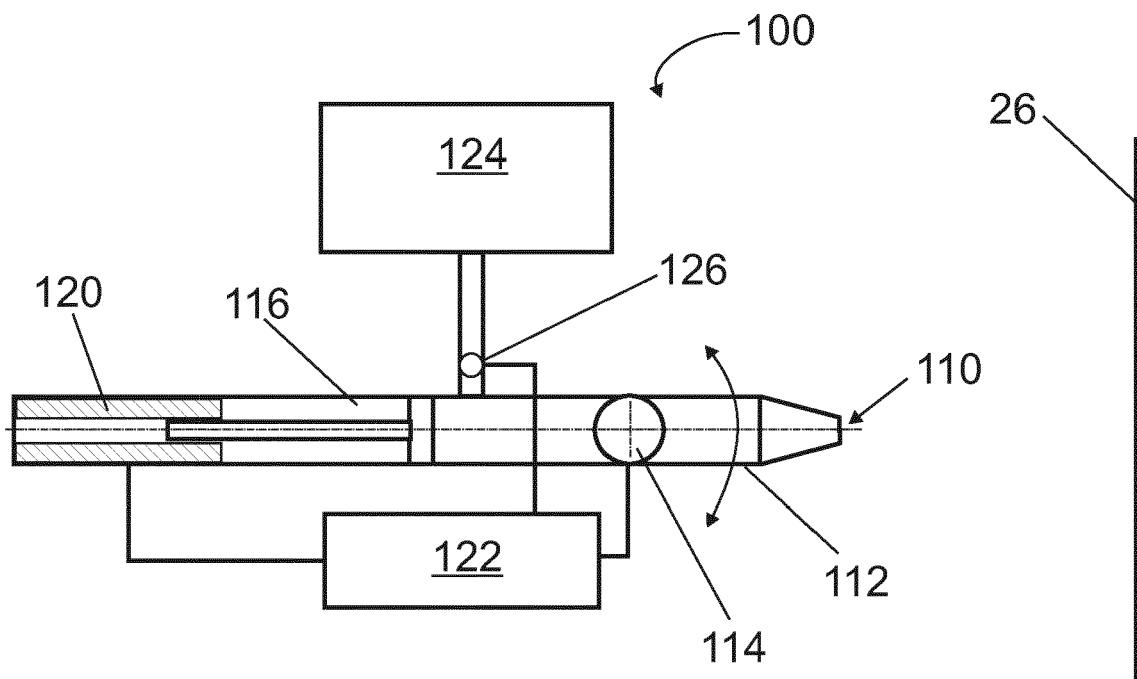


Fig. 16

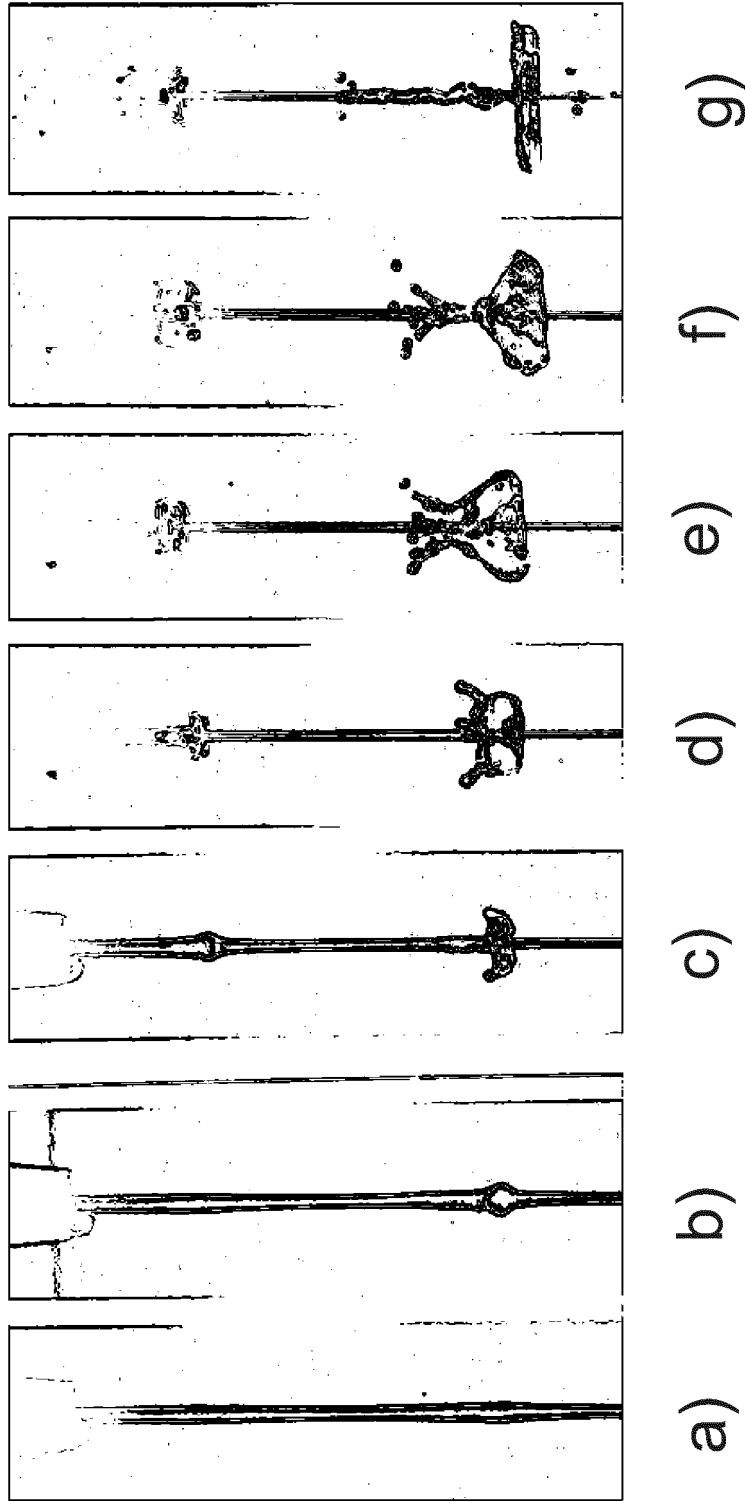


Fig. 15



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 18 18 9240

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 2 354 338 A1 (TOTO LTD [JP]) 10. August 2011 (2011-08-10)	1,5-10	INV. B05B1/08 B08B3/02 B24C5/04 B26F3/00 E21C25/60 E21D9/10 E21B7/18
A	* Absätze [0098], [0100], [0101], [0107]; Abbildungen 6A-6B, 7A-7B *	2-4	
X	DE 37 00 587 A1 (WOMA MAASBERG CO GMBH W [DE]) 21. Juli 1988 (1988-07-21) * Spalte 3, Zeile 46 - Zeile 64; Abbildungen 1, 2 *	1,5-13	
X	Meier ET AL: "Zerfall pulsierender Wasserstrahlen = Breakdown of Pulsating Water Jets", TIB AV-Portal, 1. Januar 1990 (1990-01-01), Seiten 1-1, XP054979028, DOI: 10.3203/IWF/E-3175 Gefunden im Internet: URL:https://av.tib.eu/media/12916 [gefunden am 2019-01-16] * vgl. das Video von der Minute 9:44 bis 10:03 *	1,8	
A	US 2011/061160 A1 (MOCHITA MASAYUKI [JP] ET AL) 17. März 2011 (2011-03-17) * das ganze Dokument *	1,8,10	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) B05B E03D B24C B26F E21C E21D E21B B08B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 16. Januar 2019	Prüfer Gineste, Bertrand
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 18 18 9240

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

16-01-2019

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2354338 A1	10-08-2011	AT 550496 T	15-04-2012
		CN 102146697 A	10-08-2011
		EP 2354338 A1	10-08-2011
		JP 5569778 B2	13-08-2014
		JP 2011163000 A	25-08-2011
		TW 201144539 A	16-12-2011
		US 2011191951 A1	11-08-2011

DE 3700587 A1	21-07-1988	KEINE	

US 2011061160 A1	17-03-2011	CN 102317547 A	11-01-2012
		EP 2397614 A1	21-12-2011
		KR 20110122676 A	10-11-2011
		TW 201035421 A	01-10-2010
		US 2011061160 A1	17-03-2011
		WO 2010092911 A1	19-08-2010

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102011080852 A1 [0004]
- EP 2145689 A1 [0008]
- US 3687147 A [0009]
- DE 60028949 T2 [0010]
- DE 2152005 A1 [0012]
- DE 3343555 C1 [0013] [0014]
- US 3343794 A [0014]
- US 4863101 A [0014]
- DE 2152003 A [0016]
- DE 3724864 C1 [0017]
- US 3924805 A [0019]
- EP 2714406 A1 [0022]
- EP 2485847 A2 [0025]
- EP 2877697 A1 [0028]
- WO 2014018977 A1 [0028]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **COOLEY, W. C.** *Rock Breakage by Pulsed High Pressure Water Jets, First International Symposium on Jet Cutting Technology*, 1972, vol. B7 [0031]
- **NEBEKER, E. B. ; RODRIGUEZ, S. E.** *Percussive Water Jets for Rock Cutting, Third International Symposium on Jet Cutting Technology. BHRA Fluid Engineering*, 1976, vol. B-1 [0031]
- **NEBEKER, E. B.** *Development of Large-Diameter Percussive Jets. First U. S. Water Jet Symposium, Colorado School of Mines*, 1981, vol. 1-11, IV5 [0031]
- **NEBEKER, E. B.** *Standoff Distance Improvement Using Percussive Jets. Proc. 2nd U.S. Water Jet Conference, WJTA*, 1983, 25-34 [0031]
- **DEHKHODA, S.** *Experimental Study of Rock Breakage with Pulsed Waterjet, 8th Asian Rock Mechanics Symposium ARMS8*, 2014 [0031]
- **METCALFE, R. A. ; DAVIES, T. W.** *Experimental Study of the Impact of Broken Water Jets. 4th International Symposium on Jet Cutting Technology*, 1978 [0031]
- **LICHTAROWICZ, A. ; NWACHUKWU, G.** *Erosion by an Interrupted Jet. Proc. 4th International Symposium on Jet Cutting Technology*, 1978, 13-18 [0031]
- **VIJAY, M.M. ; REMISZ, J. ; SHEN, X.** *Fragmentation of Hard Rocks with Discontinuous Water Jets. Proc. 3rd Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology*, 1992, 201-224 [0031]
- **CHAHINE, G. L. ; CONN, A. F. ; JOHNSON, V. E. ; FREDERICK, G. S.** *Cleaning and Cutting with Self-Resonating Pulsed Water Jets. Proc. 2nd U.S. Water Jet Conference, WJTA*, 1983, 167-173 [0031]
- **CONN, A.F.** *Asbestos Removal with Self-Resonating Water Jets. Proc. 5th U.S. Water Jet Symposium*, 1989, 133-139 [0031]
- **BORTOLUSSI, A., R. ; CICCUCU, W.M. ; KIM, P.P. ; MANCA, P. ; MASSACCI, G.** *Jet Power Optimization in Granite Kerfing Using Oscillating Nozzles. Proc. 6th American Water Jet Conference*, 1991, 71-86 [0031]
- **FOLDYNA, J. ; SITEK, L. ; SVEHLA, B. ; SVEHLA, S.** *Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, vol. 11, 131-137 [0031]
- **BODNÁROVÁ, L. ; SITEK, L. ; HELA, R. ; FOLDYNA, J.** *New Potential Of Highspeed Water Jet Technology For Renovating Concrete Structures. Slovak Journal of Civil Engineering*, 2011, vol. XIX (2), 1-7 [0031]
- **AUGUSTIN W. ; FUCHST. ; FÖSTE H. ; SCHÖLER, M. ; MAJSCHAK, J.-P. ; SCHOLL, S.** *Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. Food and Bioproducts Processing*, 2010, vol. 88, 384-391 [0031]
- **WEIDEMANN, C. ; VOGT, S. ; NIRSCHL, H.** *Cleaning of filter media by pulsed flow - Establishment of dimensionless operation numbers describing the cleaning result. Journal of Food Engineering*, 2014, vol. 132, 29-38 [0031]
- **STOYE, H. ; KÖHLER, H. ; MAUERMANN, M. ; MAJSCHAK, J.-P.** *Untersuchungen zur Steigerung der Reinigungseffizienz durch pulsierende Spritzreinigung. Chem. Ing. Tech.*, 2014, vol. 86 (5), 707-713 [0031]
- **M. R. NOBARI ; Y.-J. JAN G. TRYGGVASON.** *Head-on collision of drops-A numerical investigation. Physics of Fluids*, 1996, vol. 8 (1), 29-42 [0051]
- **M.D. SAROKA ; N. ASHGRIZ ; M. MOVASSAT.** *Numerical Investigation of Head-on Binary Drop Collisions in a Dynamically Inert Environment. Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2012, vol. 5 (1), 23-37 [0052]

- **P. GERULLIS ; ST. SCHUSTER.** Archerfish Actively Control the Hydrodynamics of Their Jets. *Current Biology*, 2014, vol. 24, 2156-2160 **[0053]**