



(11) **EP 3 970 914 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**23.03.2022 Patentblatt 2022/12**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):  
**B24B 1/00 (2006.01) B24B 31/10 (2006.01)**  
**B24B 31/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **21196882.1**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):  
**B24B 31/003; B24B 31/10**

(22) Anmeldetag: **15.09.2021**

(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**

- **HEGGER, Christian**  
32657 Lemgo (DE)
- **LAHODA, Christian**  
10553 Berlin (DE)
- **SCHREINER, Valentin**  
12167 Berlin (DE)
- **MAAS, Jürgen**  
32756 Detmold (DE)
- **KUCHE, Yves**  
10587 Berlin (DE)
- **POLTE, Julian**  
10587 Berlin (DE)
- **UHLMANN, Eckart**  
10587 Berlin (DE)

(30) Priorität: **16.09.2020 DE 102020211589**

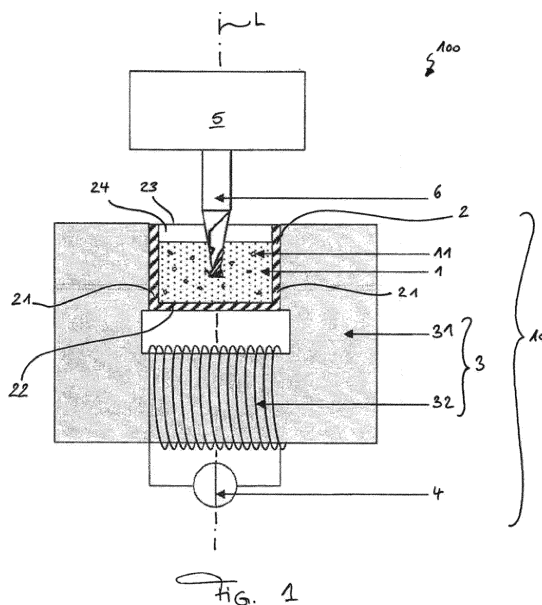
(71) Anmelder: **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT zur Förderung der angewandten Forschung e.V.**  
**80686 München (DE)**

(74) Vertreter: **Pfenning, Meinig & Partner mbB Patent- und Rechtsanwälte**  
**Joachimsthaler Straße 10-12**  
**10719 Berlin (DE)**

(72) Erfinder:  
• **STRECKENBACH, Jan**  
**14052 Berlin (DE)**

(54) **VORRICHTUNG ZUM BEAUFSCHLAGEN EINER MAGNETORHEOLOGISCHEN FLÜSSIGKEIT MIT EINEM MAGNETFELD, SYSTEM UND VERFAHREN ZUM BEARBEITEN EINES WERKSTÜCKS MITTELS DER MAGNETORHEOLOGISCHEN FLÜSSIGKEIT**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld, umfassend einen Behälter zum Aufnehmen einer magnetorheologischen Flüssigkeit, aufweisend eine vorzugsweise nach oben gerichtete Öffnung zum zumindest teilweisen Eintauchen des Werkstücks und/oder Werkzeugs in die magnetorheologische Flüssigkeit, zumindest einen an dem Behälter angeordneten Elektromagneten zum Anlegen eines Magnetfeldes an den Behälter, wobei der Elektromagnet einen magnetischen Leiter und eine um den Leiter gewickelte Spule umfasst und eine mit der Spule elektrisch verbundene Stromquelle. Ferner betrifft die Erfindung ein System und ein Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs mittels der magnetorheologischen Flüssigkeit.



**EP 3 970 914 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Anmeldung betrifft eine Vorrichtung zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld. Ferner betrifft sie ein System und ein Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs mittels der magnetorheologischen Flüssigkeit.

**[0002]** In nahezu allen technischen Bereichen haben mikroelektronische und mechanische Systeme (MEMS) Einzug gehalten, die mittels Mikrofertigung hergestellt werden. Einen zentralen Bestandteil der Mikrofertigung stellt das Mikrofräsen dar. Beim Mikrofräsen handelt es sich um einen Zerspanvorgang mit geometrisch bestimmter Schneide. Das Mikrofräsen bietet die Möglichkeit Präzisionsbauteile mit hoher geometrischer Vielfalt in Kombination mit einer großen Werkstoffbandbreite fertigen zu können. Aufgrund der Anforderungen an Form- und Maßgenauigkeit der generierten Bauteile wird für eine prozesssichere Zerspanung eine spezielle Werkzeugvorbereitung benötigt. Einen zentralen Bestandteil dieser Werkzeugvorbereitung stellt die Schneidkantenpräparation von Mikrofräswerkzeugen dar. Zur gezielten Schneidkantenpräparation kommen eine Vielzahl von Präparationsverfahren zum Einsatz, beispielsweise Bürsten, Strahlspanen, Laserstrahlabtragen, Magnetfinishing oder Tauchgleitlappen.

**[0003]** Sowohl die Schneidkantenpräparation von Mikrofräswerkzeugen als auch das Mikroentgraten vereint die Schwierigkeit, Werkstückkanten definiert und reproduzierbar zu präparieren. Aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge von Einflussfaktoren, wie Bewegungskinematik, Bearbeitungsmedium und Eingriffsverhältnissen, gelang es bis jetzt nur unzureichend eine genaue und anforderungsgerechte Kantenpräparation zu ermöglichen.

**[0004]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Vorrichtung vorzuschlagen, die gegenüber diesem Stand der Technik eine alternative, vorzugsweise verbesserte, Mikrobearbeitung, insbesondere eine verbesserte Schneidkantenpräparation, ermöglicht. Ferner ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein entsprechendes System und ein entsprechendes Verfahren vorzuschlagen, das eine alternative, vorzugsweise verbesserte, Werkstück- oder Werkzeugbearbeitung ermöglicht. Insbesondere kann es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung sein, eine Präparation von Werkzeugen mit Durchmessern  $100 \mu\text{m} \leq D \leq 1.000 \mu\text{m}$  zu verbessern.

**[0005]** Die vorgeschlagene Vorrichtung dient zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld. So können ein Werkzeug oder Werkstück, das sich in der magnetorheologischen Flüssigkeit befindet, bearbeitet werden.

**[0006]** Die Vorrichtung umfasst einen Behälter zum Aufnehmen einer magnetorheologischen Flüssigkeit, aufweisend eine vorzugsweise nach oben gerichtete Öffnung zum zumindest teilweisen Eintauchen des Werk-

stücks und/oder Werkzeugs in die magnetorheologische Flüssigkeit, zumindest einen an dem Behälter angeordneten Elektromagneten zum Anlegen eines Magnetfeldes an den Behälter, wobei der Elektromagnet einen magnetischen Leiter und eine um den Leiter gewickelte Spule sowie eine mit der Spule elektrisch verbundene Stromquelle umfasst.

**[0007]** Die Vorrichtung kann insbesondere dazu geeignet sein, in oder an einer Werkzeugmaschine zur Herstellung oder Bearbeitung von Werkstücken mit Funktionsmerkmalen im Mikrometerbereich oder Werkzeugen mit Funktionsmerkmalen im Mikrometerbereich angebracht zu werden.

**[0008]** Der Behälter ist typischerweise zumindest teilweise mit einer magnetorheologischen Flüssigkeit gefüllt. Dabei handelt es sich insbesondere um eine abrasive magnetorheologische Flüssigkeit. Die magnetorheologische Flüssigkeit kann insbesondere ein Trägeröl, insbesondere Polyalphaolefin-Öl, und ein Abrasivmedium, insbesondere Diamant, Korund und/oder Siliziumcarbonat, umfassen. Ferner kann die magnetorheologische Flüssigkeit stabilisierende Additive umfassen, beispielsweise Thixotropiemittel, Netz- und Dispergieradditiv und/oder Oxidationsinhibitoren. Die verwendete magnetorheologische Flüssigkeit kann mit abrasiven Diamantpartikeln mit einer Volumenpartikelkonzentration von bis zu CA = 15 % angereichert werden.

**[0009]** Der Behälter kann quaderförmig oder würfelförmig sein. Ein Innenraum des Würfels oder Quaders ist typischerweise hohl zum Aufnehmen der magnetorheologischen Flüssigkeit. Insbesondere ist eine obere Seitenfläche des Quaders bzw. Würfels geöffnet oder enthält eine Öffnung. In einer anderen Ausführungsform ist der Behälter um seine Längsachse rotationssymmetrisch und weist insbesondere die Form eines Hohlzylinders auf. Dieser kann eine kreisrunde Bodenplatte aufweisen und nach oben geöffnet sein. Insbesondere ist eine obere Seitenfläche des Zylinders bzw. Hohlzylinders geöffnet oder enthält eine Öffnung.

**[0010]** Die Behälterwände können eine konstante Dicke oder unterschiedliche Materialstärken aufweisen. Die Bodenplatte des Behälters kann die gleiche oder eine sich von der Wanddicke unterscheidende Dicke aufweisen. Vorzugsweise umfasst der Behälter PVC und/oder einen anderen dia- oder paramagnetischen Werkstoff.

**[0011]** Eine Wandstärke bzw. Bodenstärke des Behälters kann insbesondere mindestens 0,5 mm, bevorzugt mindestens 2 mm, besonders bevorzugt mindestens 3 mm betragen und/oder kann höchstens 5 mm, bevorzugt höchstens 4,5 mm, besonders bevorzugt höchstens 4 mm betragen.

**[0012]** Der Behälter kann eine Höhe und/oder Breite und/oder Länge und/oder einen Bodenplattendurchmesser von insbesondere mindestens 10 mm, bevorzugt mindestens 20 mm, besonders bevorzugt mindestens 30 mm aufweisen und/oder kann eine Höhe und/oder Breite und/oder Länge und/oder einen Bodenplattendurchmesser von insbesondere höchstens 200 mm, bevorzugt

höchstens 150 mm, besonders bevorzugt höchstens 120 mm betragen. Beispielsweise kann der Behälter eine Höhe und/oder Breite und/oder Länge und/oder einen Bodenplattendurchmesser von insbesondere 100 mm aufweisen.

**[0013]** In einer Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine Mehrzahl von Elektromagneten. Die Elektromagneten sind typischerweise ausgebildet wie der oben beschriebene zumindest eine Elektromagnet. Die Elektromagneten können - vorzugsweise außen - an dem Behälter angeordnet sein. Der Elektromagnet und/oder zumindest einige oder alle der Mehrzahl von Elektromagneten kann/können an einer Außenseite, insbesondere an einer Außenwand oder an mehreren Außenwänden des Behälters angeordnet sein. Der Elektromagnet bzw. die Elektromagnete können beispielsweise an eine Außenwand oder an mehrere Außenwände des Behälters geklebt sein und oder mit dieser verschraubt sein. Auch andere Fixierungsmöglichkeiten, beispielsweise mittels Klammern sind denkbar. Die Außenwände bzw. die Außenwand des Behälters kann, insbesondere integrale, Vorsprünge aufweisen, die der Halterung der Elektromagnete dienen, auf die die Elektromagneten beispielsweise aufsteckbar sind. Vorzugsweise sind die Elektromagneten mit dem Behälter unbeweglich verbunden. Die jeweilige Spule der Elektromagneten der Mehrzahl von Elektromagneten kann mit der Stromquelle oder mit jeweils einer weiteren Stromquelle verbunden sein.

**[0014]** Die Mehrzahl von Elektromagneten kann eine erste Anzahl von Elektromagneten in einer ersten Ebene umfassen. Die erste Ebene ist vorzugsweise senkrecht zur Längsachse des Behälters angeordnet. Die erste Ebene kann auch in einem spitzen oder stumpfen Winkel zur Längsachse des Behälters angeordnet sein. Eine zweite Anzahl von Elektromagneten kann in einer zweiten Ebene, vorzugsweise senkrecht zur Längsachse des Behälters, angeordnet sein. Die zweite Ebene kann parallel zur ersten Ebene angeordnet sein. Es kann auch vorgesehen sein, dass die erste und die zweite Ebene einen sich in einer Geraden schneiden. Eine dritte Anzahl von Elektromagneten kann in einer dritten Ebene vorzugsweise senkrecht zur Längsachse des Behälters, angeordnet sein. Die dritte Ebene kann parallel zur ersten Ebene und/oder zweiten Ebene angeordnet sein. Es können weitere Ebenen mit Elektromagneten vorgesehen sein. Vorzugsweise umfasst jede Ebene zumindest ein Spulenpaar.

**[0015]** In einer Ausführung ist mindestens ein Elektromagnet pro Ebene vorgesehen. Es können mehr als ein Elektromagnet, beispielsweise zumindest zwei oder zumindest drei oder zumindest vier oder zumindest fünf oder zumindest 10 Elektromagnete pro Ebene vorgesehen sein. Es kann eine Vielzahl von Elektromagneten pro Ebene vorgesehen, insbesondere bis zu 100 oder bis zu 50 oder bis zu 30 oder bis zu 20 Elektromagnete pro Ebene vorgesehen sein. Die Anzahl der Elektromagnete kann eine gerade oder eine ungerade Zahl sein.

**[0016]** Es können 1 bis X Ebenen von Elektromagne-

ten vorgesehen sein. X ist dabei eine natürliche Zahl. Insbesondere können zumindest drei oder zumindest vier oder zumindest fünf oder zumindest 10 Ebenen von Elektromagneten vorgesehen sein. Insbesondere können maximal 100 oder maximal 80 oder maximal 50 oder maximal 20 Ebenen von Elektromagneten vorgesehen sein.

**[0017]** Je mehr Ebenen von Elektromagneten vorgesehen sind, desto mehr Ebenen der magnetorheologischen Flüssigkeit können individuell angesteuert werden. Die Elektromagneten einer Ebene können jeweils individuell ansteuerbar sein. Die Elektromagneten einer Ebene können zeitlich versetzt ansteuerbar sein. Die Elektromagneten einer Ebene können mit verschiedenen oder gleichen Pulsen ansteuerbar sein. Es kann auch vorgesehen sein, dass einige Elektromagnete einer Ebene mit einem Puls ansteuerbar sind und einige Elektromagnete mit einem zweiten Puls ansteuerbar sind.

**[0018]** In einem Ausführungsbeispiel kann eine erste Kombination von Elektromagneten mit einem ersten Puls beaufschlagbar sein, während eine andere Kombination von Elektromagneten mit einem zweiten Puls beaufschlagbar ist. Es kann weitere Kombinationen von Elektromagneten geben, die mit weiteren Pulsen beaufschlagbar sind. Die Kombinationen von Elektromagneten können jeweils in einer Ebene und/oder in unterschiedlichen Ebenen liegen. Beispielsweise kann die erste Kombination Elektromagnete umfassen, die übereinander in verschiedenen Ebenen angeordnet sind.

**[0019]** Die Mehrzahl von Elektromagneten kann rotationssymmetrisch um die Längsachse des Behälters angeordnet sein. Insbesondere können die Elektromagneten einer Ebene, beispielsweise der ersten und/oder der zweiten und/oder der dritten Ebene, rotationssymmetrisch um die Längsachse des Behälters angeordnet sein.

**[0020]** In einer Ausführungsform sind die Elektromagneten einer Ebene gegenüber den Elektromagneten einer weiteren Ebene übereinander angeordnet und/oder versetzt zueinander angeordnet. Die Elektromagneten einer Ebene können zu den Elektromagneten einer anderen Ebene übereinander angeordnet sein und gegenüber den Elektromagneten einer weiteren Ebene versetzt angeordnet sein. Die erste Anzahl von Elektromagneten und/oder die zweite Anzahl von Elektromagneten und/oder die dritte Anzahl von Elektromagneten können/kann übereinander angeordnet sein. Die erste Anzahl von Elektromagneten und/oder die zweite Anzahl von Elektromagneten und/oder die dritte Anzahl von Elektromagneten kann versetzt zueinander angeordnet sein.

**[0021]** In einer Ausführungsform ist die Stromquelle zum Steuern der magnetischen Flussdichte regelbar. Die Stromquelle kann insbesondere ausgebildet sein, eine Erregerfrequenz zu regeln. Die Stromquelle kann derart ausgebildet sein, dass Erregerfrequenzen von zumindest 1 Hz oder zumindest 5 Hz oder zumindest 10 Hz oder zumindest 20 Hz oder zumindest 30 Hz, bevorzugt zumindest 40 Hz, besonders bevorzugt zumindest 50 Hz

und/oder Erregerfrequenzen von insbesondere höchstens 200 Hz oder höchstens 190 Hz oder höchstens 180 Hz oder höchstens 170 Hz, bevorzugt höchstens 160 Hz, besonders bevorzugt 150 Hz einstellbar sind. Besonders bevorzugt kann ein Frequenzbereich von  $50 \text{ Hz} \leq f \leq 150 \text{ Hz}$  einstellbar sein.

**[0022]** Es kann vorgesehen sein, dass die Frequenzbereiche für jeden Elektromagneten individuell regelbar sind. Beispielsweise kann dafür mehr als eine regelbare Stromquelle vorgesehen sein. Ein Elektromagnet kann mit einer Stromquelle verbunden sein. Ein zweiter Elektromagnet kann mit einer zweiten Stromquelle verbunden sein. Weitere Elektromagnete können jeweils mit einer Stromquelle verbunden sein. Es kann auch vorgesehen sein, dass eine Stromquelle mit mehr als einem Elektromagneten verbunden ist. Eine zweite Stromquelle kann mit einem oder mehreren weiteren Stromquellen verbunden sein. Die Stromquelle/n kann/können jeweils wie oben beschrieben regelbar sein.

**[0023]** Die Regelung einer Erregerfrequenz eines oder mehrerer Elektromagnete ermöglicht einen gepulsten Betrieb des/der Elektromagnete/s. Das Pulsen kann dazu dienen, die Abrasivmittel neu zu orientieren. So kann eine Effektivitätssteigerung der Bearbeitung und/oder eine Reduzierung von strömungstechnischen Totbereichen erreicht werden. Das Pulsen kann zusätzlich oder alternativ einer Erhöhung der Fluiddichte bzw. Abrasivmitteldichte an der Bearbeitungsstelle dienen. Das Pulsen kann zusätzlich oder alternativ einen Spanabtransport optimieren und/oder zu einer verbesserten Abtragsleistung führen. Das Pulsen kann zusätzlich oder alternativ einem verbesserten Abtransport von verschlissenen Carbonyleisenpartikeln dienen.

**[0024]** In einer Ausführungsform können die Elektromagnete einer Ebene alle mit einer regelbaren Stromquelle verbunden sein. Die Elektromagnete einer Ebene können alternativ jeweils mit einer anderen Stromquelle verbunden sein. Zusätzlich oder alternativ kann zumindest ein Elektromagnet einer Ebene mit einer Stromquelle und/oder zumindest ein Elektromagnet derselben Ebene mit zumindest einer weiteren Stromquelle verbunden sein.

**[0025]** Die Elektromagnete können individuell und zeitlich versetzt geschaltet werden. Die Elektromagnete können mit unterschiedlichen Frequenzen geschaltet werden. Dies kann den Vorteil haben, dass eine lokalspezifische und gerichtete Druckveränderung der magnetorheologischen Flüssigkeit erreicht werden kann.

**[0026]** Zumindest ein Permanentmagnet kann ferner an dem Behälter, vorzugsweise an einer Außenseite des Behälters angeordnet sein. Mit dem Permanentmagnet kann die magnetorheologische Flüssigkeit mit einem Magnetfeld beaufschlagt werden. Die Magnetfelder des Elektromagnets bzw. der Elektromagnete und/oder des Permanentmagnets bzw. der Permanentmagnete können sich überlagern.

**[0027]** Die Vorrichtung kann sich insbesondere eignen in eine Werkzeugmaschine, beispielsweise eine Werk-

zeugmaschine zum Mikrofräsen, eingesetzt zu werden.

**[0028]** Die vorliegende Anmeldung betrifft ferner ein System zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs, vorzugsweise eines Werkstücks mit Funktionsmerkmalen im Mikrometerbereich, nachfolgend Mikrowerkstück genannt, oder Werkzeugs mit Funktionsmerkmalen im Mikrometerbereich, nachfolgend Mikrowerkzeug genannt, mittels einer magnetorheologischen Flüssigkeit.

**[0029]** Die Abmessungen eines Mikrowerkstücks und/oder Mikrowerkzeugs können sich insbesondere dadurch auszeichnen, dass sie eine Ausdehnung, beispielsweise entlang einer Längsachse und/oder entlang einer Achse senkrecht zur Längsachse, von maximal  $10.000 \mu\text{m}$ , vorzugsweise maximal  $5.000 \mu\text{m}$ , besonders bevorzugt maximal  $2.000 \mu\text{m}$  aufweisen. Eine Ausdehnung, beispielsweise entlang einer Längsachse und/oder entlang einer Achse senkrecht zur Längsachse, kann minimal  $50 \mu\text{m}$ , vorzugsweise minimal  $80 \mu\text{m}$ , besonders bevorzugt minimal  $100 \mu\text{m}$  betragen. Die maximale Ausdehnung des Mikrowerkstücks oder Mikrowerkzeugs entlang einer Geraden kann maximal  $2.000 \mu\text{m}$ , vorzugsweise maximal  $1.500 \mu\text{m}$ , besonders bevorzugt maximal  $1.000 \mu\text{m}$  und/oder minimal  $50 \mu\text{m}$ , vorzugsweise minimal  $80 \mu\text{m}$ , besonders bevorzugt minimal  $100 \mu\text{m}$  betragen.

**[0030]** Das System umfasst typischerweise eine Vorrichtung gemäß obiger Ausführung. Ferner umfasst das System eine Werkstückaufnahme zum Aufnehmen eines zu bearbeitenden Werkstücks und/oder Werkzeugs, insbesondere eines Mikrowerkstücks und/oder Mikrowerkzeugs. Die Werkstückaufnahme kann derart zwischen einer ersten und einer zweiten Position verfahrbar sein, dass das Werkstück und/oder das Werkzeug in einer ersten Position außerhalb eines Innenraums des Behälters, nachfolgend Behälterinnenraum, angeordnet ist und zumindest in einer zweiten Position teilweise in dem Behälterinnenraum, insbesondere zumindest teilweise in einer darin angeordneten magnetorheologischen Flüssigkeit, angeordnet ist. Die Werkzeugaufnahme kann ferner in weitere Positionen verfahrbar sein. Vorzugsweise sind die weiteren Positionen so lokalisiert, dass in den weiteren Positionen das Werkstück und/oder Werkzeug teilweise in dem Behälterinnenraum, insbesondere zumindest teilweise in einer darin angeordneten magnetorheologischen Flüssigkeit, angeordnet ist.

**[0031]** Das System kann zumindest eine weitere Werkstückaufnahme zum gleichzeitigen Einbringen von zwei Werkzeugen und/oder Werkstücken in den Behälterinnenraum aufweisen.

**[0032]** Zumindest eine Werkstückaufnahme kann entlang einer Achse, vorzugsweise entlang zweier Achsen, besonders bevorzugt entlang dreier Achsen verfahrbar sein. Die Achsen können insbesondere senkrecht zueinander stehen. Zusätzlich oder alternativ kann zumindest eine oder dieselbe Werkzeugaufnahme um zumindest eine Achse und/oder um zumindest zwei Achsen und/oder um zumindest drei Achsen rotierbar sein.

**[0033]** In einer Ausführung weist das System einen Mehrachsroboter, vorzugsweise einen Fünf-Achs-Roboter oder einen Sechs-Achs-Roboter auf. Insbesondere kann die Werkstückaufnahme oder zumindest eine der Werkstückaufnahmen an dem Mehrachsroboter angeordnet sein. Der Mehrachsroboter kann beispielsweise als Industrieroboter ausgebildet sein, umfassend einen Roboterarm.

**[0034]** Ferner betrifft die Anmeldung ein Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs, vorzugsweise eines Mikrowerkstücks oder Mikrowerkzeugs mittels einer magnetorheologischen Flüssigkeit.

**[0035]** Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte, die vorzugsweise in der nachfolgenden Reihenfolge ausgeführt werden.

I. Bereitstellen eines zuvor beschriebenen Systems,

II. Einsetzen, insbesondere Einspannen, eines Werkstücks und/oder Werkzeugs in die Werkstückaufnahme,

III. Verfahren der Werkstückaufnahme mit eingesetztem Werkstück und/oder Werkzeug in eine zweite Position, in der das Werkstück und/oder das Werkzeug zumindest teilweise in die magnetorheologische Flüssigkeit eingetaucht ist,

IV. Beaufschlagen der in dem Behälter angeordneten magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld, insbesondere durch Versorgen von zumindest einem Elektromagneten mit Strom durch die Stromquelle.

**[0036]** Im ersten Schritt ist der Behälter vorzugsweise zumindest teilweise mit einer magnetorheologischen Flüssigkeit gefüllt. Der Behälter kann jedoch auch erst nach dem zweiten Schritt mit der magnetorheologischen Flüssigkeit gefüllt werden.

**[0037]** Im zweiten Schritt befindet sich die Werkstückaufnahme vorzugsweise in einer ersten, außerhalb des Behälters angeordneten Position.

**[0038]** Das Werkstück/Werkzeug kann in dem Behälter verfahren werden, um eine Relativgeschwindigkeit und somit eine Werkstofftrennung zu erzeugen.

**[0039]** Durch die Beaufschlagung der magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld kann das in der magnetorheologischen Flüssigkeit angeordnete Werkstück und/oder Werkzeug bearbeitet werden.

**[0040]** Das Werkstück/Werkzeug kann durch die geschaltete, d.h. mit einem Magnetfeld beaufschlagte, magnetorheologische Flüssigkeit geführt werden. So kann eine Werkstofftrennung bewirkt werden. Durch die Beaufschlagung mit dem Magnetfeld können sich die magnetischen Partikel in der magnetorheologischen Flüssigkeit, beispielsweise Eisenpartikel, entlang der magnetischen Feldlinien ausrichten. Diese Partikel können für ein "Festhalten" der Abrasivpartikel sorgen. Die ge-

schaltete magnetorheologische Flüssigkeit kann dabei ruhend sein.

**[0041]** Alternativ kann die magnetorheologische Flüssigkeit und/oder darin befindliche abrasive Teilchen durch die Beaufschlagung mit dem Magnetfeld bewegt werden, sodass zumindest teilweise ein Abtrag einer Werkstück- und/oder Werkzeugoberfläche bewirkt wird.

**[0042]** In einer Ausführungsform kann im vierten Verfahrensschritt die magnetorheologische Flüssigkeit mit einem homogenen oder inhomogenen Magnetfeld beaufschlagt werden. Ein homogenes Magnetfeld kann den Vorteil haben, dass hierdurch eine homogene Werkstofftrennung und somit eine homogene Bearbeitung gewährleistet werden kann.

**[0043]** In einer Ausführung umfasst Schritt IV eine Änderung der magnetischen Flussdichte des Magnetfelds. Insbesondere kann die magnetische Flussdichte durch Ändern des angelegten Stroms zum Versorgen des zumindest einen Elektromagneten geändert werden. Zusätzlich oder alternativ können gleichzeitig oder nacheinander unterschiedliche Elektromagnete der Mehrzahl von Elektromagneten mit Strom versorgt werden. Vorzugsweise werden zumindest zwei Elektromagnete gleichzeitig als Spulenpaar betrieben. Nacheinander können verschiedene Spulenpaare betrieben werden.

**[0044]** In Schritt IV können gleichzeitig zumindest ein Elektromagnet der ersten und/oder der zweiten und/oder der dritten Ebene betrieben werden. Vorzugsweise können gleichzeitig zumindest zwei Elektromagneten der ersten und/oder der zweiten und/oder der dritten Ebene betrieben werden.

**[0045]** So können je nach Anforderungen an das zu bearbeitende Werkstück oder Werkzeug verschiedene magnetische Flussdichten realisiert werden, die einen entsprechenden Materialabtrag oder eine Materialtrennung an der Werkstück- und/oder Werkzeugoberfläche zur Folge haben. Je nach Intensität der magnetischen Flussdichte kann die Oberfläche des Werkstücks und/oder Werkstücks lokal verschieden stark abgetragen und/oder Werkstoff abgetrennt werden.

**[0046]** In einer Ausführung können die Elektromagneten in Schritt IV pulsierend betrieben werden, sodass sich das Magnetfeld zeitlich ändert. So kann die magnetorheologische Flüssigkeit mit einem inhomogenen Magnetfeld beaufschlagt werden, wodurch ein variabler Bearbeitungsdruck  $P_B$  in Abhängigkeit einer Eintauchtiefe  $t$  des in die magnetorheologische Flüssigkeit eingetauchten Werkstücks oder Werkzeugs eingestellt werden kann.

**[0047]** In einer Ausführung kann, insbesondere während die magnetorheologische Flüssigkeit mit einem Magnetfeld beaufschlagt wird, das Werkstück und/oder Werkzeug durch die magnetorheologische Flüssigkeit geführt werden. So kann beispielsweise eine Eintauchtiefe des Werkstücks und/oder Werkzeugs verändert werden. Das Werkstück und/oder Werkzeug kann entlang einer oder mehrerer translatorischer Achsen durch die magnetorheologische Flüssigkeit geführt werden.

Beispielsweise kann es entlang einer helixförmigen Bahn geführt werden. Zusätzlich oder alternativ kann das Werkstück und/oder Werkzeug in der magnetorheologischen Flüssigkeit um zumindest eine Achse rotiert werden. Eine Drehzahl in 1/min kann dabei zumindest 10, bevorzugt zumindest 100, besonders bevorzugt zumindest 1.000 und/oder höchstens 100.000, bevorzugt höchstens 50.000, besonders bevorzugt höchstens 10.000 betragen.

**[0048]** In einer Ausführung kann vor der Durchführung von Schritt IV ein Winkel zwischen einer Werkstücklängsachse und/oder einer Werkzeuglängsachse und der Behälterlängsachse eingestellt werden. Zusätzlich oder alternativ kann während der Durchführung von Schritt IV ein Winkel zwischen einer Werkstücklängsachse und/oder einer Werkzeuglängsachse und der Behälterlängsachse verändert werden. Hierdurch kann die Werkstofftrennung gezielt beeinflusst werden.

**[0049]** Durch die Bewegung des Werkstücks und/oder Werkzeugs in der magnetorheologischen Flüssigkeit und/oder eine Variation der Eintauchtiefe und/oder des Eintauchwinkels kann Einfluss auf die herrschenden Druck- und Strömungsverhältnisse in der magnetorheologischen Flüssigkeit genommen werden. So kann die Bearbeitung einzelner Kanten ermöglicht werden.

**[0050]** Zusätzlich oder alternativ zu der geometrischen Variation der Bewegungsbahn des Werkstücks und/oder Werkzeugs können über die Steuerung der magnetischen Flussdichte B mittels der regelbaren Stromquelle die rheologischen Eigenschaften der magnetorheologischen Flüssigkeiten beeinflusst werden. Auf diese Weise kann eine gepulste Bearbeitung erreicht werden, wodurch das Bearbeitungsergebnis verbessert werden kann. Die Vorteile der gepulsten Bearbeitung sind kürzere Bearbeitungsdauern und/oder geringere Oberflächenrauheiten.

**[0051]** Zum Entnehmen des Werkzeugs bzw. Werkstücks kann die Werkstückaufnahme mit eingesetztem Werkstück und/oder eingesetztem Werkzeug in eine Position außerhalb des Behälters, insbesondere in die erste Position, verfahren werden.

**[0052]** Die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens, des Systems und der Vorrichtung können in der Schneidkantenpräparation und bei nahezu allen Bearbeitungen, die eine Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide benötigen, bestehen. Die Schneidkantenpräparation findet in nahezu allen technischen Bereichen Anwendung. Unter anderem in der Dental- und Medizintechnik, der Elektroindustrie, der optischen Industrie sowie im Formen- und Werkzeugbau. Es kann beispielsweise eine Präparation der Schneidkanten von Fräswerkzeugen zur Zerspanung von Werkzeugelektroden aus Graphit erfolgen. Die damit gefertigten präzisen Spritzgussformen können hochkomplexe und mikrostrukturierte Kunststoffbauteile, wie zum Beispiel Endoskoplinsen und Mikrozahnräder gefertigt werden. Neben der Schneidkantenpräparation kann ein weiteres Anwendungsgebiet die Entgratung der gefertigten Mikrobauteile sein. Sowohl

bei der Mikrozerspanung als auch beim Mikrospritzguss treten feine Grate oder Anspritzpunkte auf, die zu einem fehlerfreien Betrieb des Bauteils entfernt werden müssen. Dies kann ebenfalls mit dem beschriebenen Verfahren bzw. der Vorrichtung und/oder des Systems realisierbar sein. Darüber hinaus kann eine Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile möglich sein. Diese weisen aufgrund des schichtweisen Aufbaus einen höheren Mitterauwert Ra als konventionell gefertigte Bauteile auf. Mit dem beschriebenen Verfahren bzw. der Vorrichtung und/oder des Systems kann eine Glättung der Oberfläche sowie eine definierte Rundung der Kanten realisiert werden.

**[0053]** Die vorliegende Anmeldung umfasst mehrere Ausführungsformen. Die folgende detaillierte Beschreibung zeigt und beschreibt weitere, exemplarische Ausführungsformen der Erfindung. Dementsprechend sind die Zeichnungen und die detaillierte Beschreibung als illustrativ und nicht einschränkend zu betrachten.

**[0054]** Es zeigen

Fig. 1 ein System zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs mittels einer magnetorheologischen Flüssigkeit,

Fig. 2a eine schematische Querschnittsansicht durch den Behälter des Systems der Figur 1,

Fig. 2b eine schematische Längsschnittansicht durch den Behälter des Systems der Figur 1 mit eingezeichnetem Mikrofräswerkzeug,

Fig. 2c eine schematische Längsschnittansicht durch den Behälter des Systems der Figur 1 mit eingezeichnetem Mikrofräswerkzeug sowie einen Vergleich zum Tauchgleitläppen,

Fig. 3 eine Querschnittansicht einer Vorrichtung zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld, und

Fig. 4 die Vorrichtung gemäß Figur 3 in einem Längsschnitt.

**[0055]** Figur 1 zeigt ein System 100 zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs mittels einer magnetorheologischen Flüssigkeit 1. Das System 100 ist schematisch dargestellt, sodass Dimensionen und Dimensionsverhältnisse von realen Dimensionen abweichen können. Ferner sind die einzelnen Komponenten nicht zwingend wirklichkeitsgetreu abgebildet, sondern im Wesentlichen schematisch zum Zwecke der Funktionserläuterung. Das System 100 umfasst eine Vorrichtung 10 zum Beaufschlagen der magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld.

**[0056]** Dafür weist die Vorrichtung 10 einen Behälter 2 zum Aufnehmen der magnetorheologischen Flüssigkeit 1 auf. Der Behälter 2 hat eine Längsachse L. In Figur

1 ist der Behälter 2 in einem Schnitt entlang der Längsachse L gezeigt. Der Behälter 2 ist im Wesentlichen quaderförmig ausgebildet, wobei er Seitenwände 21 und einen Boden 22 aufweist. Nach oben ist der Behälter 2 geöffnet, weist also eine Öffnung 23 auf, die im Wesentlichen der Fläche des Bodens 22 entspricht. Die Seitenwände 21 und der Boden 22 definieren einen Behälterinnenraum 24, der zumindest teilweise mit der magnetorheologischen Flüssigkeit 1 gefüllt ist. Die gezeigte magnetorheologische Flüssigkeit 1 umfasst ein Trägeröl, vorliegend ein Polyalphaolefin-Öl, mit einem Abrasivmedium 11, vorliegend Diamant. Die magnetorheologische Flüssigkeit 1 füllt etwa 80 % des Behälterinnenraums 24 aus.

**[0057]** Ein Elektromagnet 3 ist außen an dem Behälter angeordnet. Der Elektromagnet 3 umfasst einen magnetischen Leiter 31 und eine um den magnetischen Leiter 31 gewickelte Spule 32. Der magnetische Leiter 31 umfasst 11Smn30. Die Spule 32 umfasst Kupfer. Die Spule 32 hat typischerweise zwischen 300 und 1.000 Windungen. Die Spule 32 ist elektrisch mit einer Stromquelle 4 verbunden. Die Stromquelle 4 ist regelbar, sodass eine magnetische Flussdichte des Elektromagneten 3 regelbar ist. Mit der regelbaren Stromquelle 4 können Erregerfrequenzen  $f$  von 50 Hz bis 150 Hz eingestellt werden.

**[0058]** Ferner umfasst das System 100 eine verfahrbare Werkstückaufnahme 5, in die ein Werkstück, vorliegend ein Mikrofräs Werkzeug 6, eingespannt ist. Die Werkstückaufnahme 5 ist vorliegend eine Werkzeugspindel einer 5-Achs-Fräsmaschine.

**[0059]** Wiederkehrende Merkmale werden zur besseren Übersichtlichkeit und Verständlichkeit in den nachfolgenden Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

**[0060]** In Figur 2a ist der Behälter 2 in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse l gezeigt. Der Behälter 2 ist mit der magnetorheologischen Flüssigkeit 1 gefüllt. Schematisch ist mittels Pfeilen eine Bewegungsbahn 7 dargestellt, die zeigt, wie das Mikrofräs Werkzeug zur Schneidkantenpräparation durch die magnetorheologische Flüssigkeit 1 bewegt werden kann. Dabei wird die Bewegung entlang der Bewegungsbahn 7 durch Verfahren der Werkzeugaufnahme 5 entlang zumindest einiger der fünf Achsen der 5-Achs-Fräsmaschine realisiert. Ferner wird das Mikrofräs Werkzeug 6 mit einer Drehzahl  $n_s$  um eine Längsachse des Mikrofräs Werkzeugs 6 rotiert. Im gezeigten Beispiel beträgt die Drehzahl beispielsweise 10.000 1/min.

**[0061]** In Figur 2a ist der Behälter 2 der Figuren 1 und 2a in einem Längsschnitt entlang der in Figur 2a eingezeichneten Linie A-A gezeigt. Das Mikrofräs Werkzeug 6 ist gegenüber der Behälterlängsachse L um einen Winkel  $\alpha_E$  angestellt. Dieser beträgt im vorliegenden Beispiel 45°, kann jedoch variiert werden. Insbesondere kann der Winkel auch während des Schneidkantenpräparationsverfahrens variiert werden. Ferner wird eine Eintauchtiefe  $T_E$  variiert, sodass neben der in Figur 2a dargestellten Bewegungsbahn 7 in horizontaler Ebene die Bewe-

gungsbahn 7' in vertikaler Ebene wie in Fig. 2b dargestellt verläuft.

**[0062]** Bei der Präparation des Mikrofräsers 6 kann dieser somit direkt in die Spindel der Werkzeugmaschine 5 eingespannt werden. Dadurch wird das spätere Umspannen des Werkzeugs obsolet und ein Verfahrensschritt eingespart. Im Anschluss wird das Werkzeug, hier das Mikrofräs Werkzeug 6, mithilfe der Antriebsachsen der Werkzeugmaschine innerhalb der magnetorheologischen Flüssigkeit 1 bewegt, sodass auch hochkomplexe Bewegungsstrategien realisierbar sind. Darüber hinaus kann die Bewegung je nach Geometrie des zu bearbeitenden Werkstücks um eine Variation der Eintauchtiefe  $T_E$  sowie des Eintauchwinkels  $\alpha_E$  ergänzt und so Einfluss auf die herrschenden Druck- und Strömungsverhältnisse genommen werden. Somit wird auch die Bearbeitung einzelner Kanten ermöglicht. Zusätzlich zu der geometrischen Variation der Bewegungsbahn können über die Steuerung der magnetischen Flussdichte B mittels einer regelbaren Stromquelle die rheologischen Eigenschaften der magnetorheologischen Flüssigkeiten beeinflusst werden. Auf diese Weise kann eine gepulste Bearbeitung erreicht werden, wodurch das Bearbeitungsergebnis signifikant verbessert wird. Über die regelbare Stromquelle sind Erregerfrequenzen im Bereich von  $50 \text{ Hz} \leq f \leq 150 \text{ Hz}$  realisierbar.

**[0063]** Mit der Vorrichtung 10 bzw. dem System 100 und dem Verfahren können einzelne Schneiden oder Kanten und Flächen eines Werkstücks unterschiedlich stark bearbeitet werden. Dadurch ist eine genaue Einstellung einer Schneidkantenrundung  $r_\beta$  sowie einer Kantenverrundung an zu bearbeitenden Mikrobauanteilen möglich. Dies kann durch anisotrope rheologische Eigenschaften der magnetorheologischen Flüssigkeit erreicht werden, da die maximale Fließgrenze  $\tau$  und somit die Prozesskräfte  $F_P$  orthogonal zum magnetischen Fluss  $\Phi$  auftreten. So kommt es im Vergleich zum Tauchgleitlappen vor allem bei Flächen und Kanten, die sich in einem Winkel  $\alpha_E$  zwischen 60° und 90° zu den magnetischen Feldlinien befinden, zur erhöhten Werkstofftrennung.

**[0064]** In Figur 2c ist links (I) die magnetorheologische Flüssigkeit 1 mit den Abrasivpartikeln 11 dargestellt und rechts (II) ein klassisches Lappmedium 1', hier  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dargestellt. Die bearbeiteten Kanten 6' sind durch stärkere Linien hervorgehoben. Magnetische Feldlinien 8 des Elektromagneten 3 sind links (I) eingezeichnet.

**[0065]** Zusätzlich zur gezielten Bearbeitung können durch die steuerbare Fließgrenze  $\tau_0$  höhere Bearbeitungsdrücke  $p_B$  als im klassischen Tauchgleitlappprozess erreicht werden, wodurch sich die Bearbeitungszeit  $t$  im Vergleich deutlich verkürzt. Durch die Höhe der magnetischen Flussdichte B kann somit eine individuelle Anpassung des Bearbeitungsdrucks  $p_B$  erfolgen, wodurch eine werkstoff- und geometriespezifische Bearbeitung erfolgen kann. Zudem bietet dieses Verfahren auch die Nutzung von Abrasivpartikeln 11 mit sehr geringen Korngrößen  $d$ , an, z.B. Diamantpartikel mit Korngröße 5

$\mu\text{m} < d_K < 500 \mu\text{m}$ . Somit können auch empfindliche Bauteile mit Funktionsmerkmalen im Mikrometerbereich, nachfolgend Mikrobauerteile, durch Anpassung der Fließgrenze  $\tau_0$  präzise und mit einer hohen Oberflächengüte bearbeitet werden.

**[0066]** Figur 3 zeigt eine weitere beispielhafte Vorrichtung 10 zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit mit einem Magnetfeld.

**[0067]** Der Behälter 2 ist hohlzylinderförmig mit einer nach oben gerichteten Öffnung. In dem Behälter ist eine magnetorheologische Flüssigkeit 1 angeordnet. Ein Mikrowerkzeug 6 ist in die magnetorheologische Flüssigkeit 1 eingetaucht. Ein magnetischer Leiter 31 ist kreisförmig und koaxial zu der Längsachse L des Behälters angeordnet. Vorsprünge 31' des magnetischen Leiters 31 ragen in Richtung des Behälters und sind an einer Außenwand des Behälters angeordnet. Die Vorsprünge 31' sind mit Spulen 32 umwickelt, die mit einer regelbaren Stromquelle (nicht gezeigt) elektrisch verbunden sind. Elektromagneten 3 umfassend den elektrischen Leiter 31' und die Spulen sind rotationssymmetrisch um die Längsachse des Behälters 2 angeordnet. In Figur 3 ist ersichtlich, dass in einer ersten Ebene sechs Elektromagneten 3, markiert durch Großbuchstaben A, B, C, D, E, F, angeordnet sind. Die Elektromagneten A und D sind gegenüberliegend angeordnet. Die Elektromagneten C und F sind gegenüberliegend angeordnet. Die Elektromagneten B und E sind gegenüberliegend angeordnet. Aus Figur 4, zeigend einen Schnitt entlang der Längsachse L des Behälters 2, wird deutlich, dass weitere Elektromagnete 3 in zwei weiteren Ebenen angeordnet sind, markiert durch Indizes 2, 3. Die Elektromagnete A, bzw. B, bzw. C, bzw. D, bzw. E bzw. F der drei Ebenen sind jeweils untereinander angeordnet. In anderen Ausführungsbeispielen können die Elektromagnete  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  auch versetzt zueinander angeordnet sein. Dies gilt selbstverständlich auch für die Elektromagnete B, C, D, E, F oder mögliche weitere Elektromagnete.

**[0068]** Anhand der Figuren 3 und 4 wird nachfolgend das Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks, im vorliegenden Beispiel eines Mikrowerkzeugs 6, erläutert. Zunächst wird das zu bearbeitende Werkstück 6 in die Werkzeug- bzw. Präparationsmaschine 5 (hier nicht gezeigt) eingespannt. Zur Schneidkantenpräparation wird beispielsweise eine 5-Achs-Fräsmaschine genutzt, in deren Werkzeugspindel das zu bearbeitende Mikrofräs-

werkzeug eingespannt wird. Daraufhin wird das Werkstück 6 in den mit abrasiver magnetorheologischer Flüssigkeit 1 gefüllten Behälter 2 eingetaucht (siehe insbesondere Fig. 4). Beim Eintauchen wird die abrasive magnetorheologische Flüssigkeit 1 vorzugsweise noch nicht mit einem Magnetfeld beaufschlagt, um ungewünschte Präparationseffekte zu verhindern. Im nächsten Schritt wird die abrasive magnetorheologische Flüssigkeit mit einem Magnetfeld beaufschlagt. Dafür werden Elektromagnete 3 mit Strom der Stromquelle (nicht gezeigt) versorgt. Es können nur einige der Elektromagnete mit Strom versorgt werden. Bei-

spielsweise werden die Elektromagnete A und C mit Strom versorgt, um den beispielhaft eingezeichneten magnetischen Fluss 9 zum Bearbeiten der Schneidkanten des Werkstücks 6 zu erreichen.

**[0069]** In der durchgeführten Präparation wird ein homogenes Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte von 0,5 T gewählt. Dieses kann mittels einer gezielten Steuerung und einem mehrspuligen Aufbau, wie in Figur 3 und 4 gezeigt, dreidimensional durch Ansteuerung verschiedener Elektromagnete, auch in verschiedenen Ebenen, verändert werden. Zusätzlich ist auch eine zeitliche Veränderung des Magnetfelds möglich. Das Werkstück 6 wird durch die abrasive magnetorheologische Flüssigkeit 1 geführt, wie beispielsweise in Bezug auf Fig. 2a und 2b beschrieben wurde. Selbstverständlich sind auch andere Bewegungsbahnen als die der Figuren 2a und 2b möglich.

**[0070]** Mittels der 5-Achs-Fräsmaschine können innerhalb der MRF komplexe Bewegungskinematiken realisiert werden. Diese können gezielt an die Außengeometrie des zu bearbeitenden Werkstücks angepasst werden. Im gezeigten Beispielprozess wurde eine helixförmige Bahnführung in Kombination mit einer Spindeldrehzahl von  $n_s = 10.000 \text{ 1/min}$  und einer Gesamtbearbeitungsdauer von  $t_B = 9 \text{ min}$  gewählt. In anderen Verfahren kann die Bearbeitungsdauer bis zu 20 min, vorzugsweise bis zu 15 min andauern und/oder mindestens 2 min, vorzugsweise mindestens 5 min andauern.

**[0071]** Nachdem die Bearbeitungsdauer abgelaufen ist, können die Elektromagnete von der Stromversorgung getrennt werden. Das Werkstück wird in die Ausgangsposition, insbesondere außerhalb des Behälterinnenraums, gefahren und kann entnommen werden. Im beispielhaften Prozess konnte eine Steigerung der Schneidkantenrundung um 58 % auf  $r_\beta = 5,1 \mu\text{m}$  erzielt werden.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Beaufschlagen einer magnetorheologischen Flüssigkeit (1) mit einem Magnetfeld, umfassend
  - einen Behälter (2) zum Aufnehmen einer magnetorheologischen Flüssigkeit (1), aufweisend eine vorzugsweise nach oben gerichtete Öffnung (23) zum zumindest teilweisen Eintauchen des Werkstücks und/oder Werkzeugs in die magnetorheologische Flüssigkeit (1),
  - zumindest einen an dem Behälter (2) angeordneten Elektromagneten (3) zum Anlegen eines Magnetfeldes an den Behälter (2), wobei der Elektromagnet (3) einen magnetischen Leiter (31) und eine um den Leiter (31) gewickelte Spule (32) umfasst und
  - eine mit der Spule (32) elektrisch verbundene Stromquelle (4).

2. Vorrichtung gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Behälter (2) zumindest teilweise mit einer magnetorheologischen Flüssigkeit (1), insbesondere einer abrasiven magnetorheologischen Flüssigkeit (1), gefüllt ist, wobei die magnetorheologische Flüssigkeit (1) insbesondere ein Trägeröl, insbesondere Polyalphaolefin-Öl, und Carbonyleisenpartikel und ein Abrasivmedium, insbesondere Diamant, Korund und/oder Siliziumcarbonat, umfasst.
3. Vorrichtung gemäß Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Behälter (2) quaderförmig oder würfelförmig ist oder um seine Längsachse (L) rotationssymmetrisch ist, insbesondere die Form eines Hohlzylinders aufweist, der eine kreisrunde Bodenplatte aufweist und nach oben geöffnet ist.
4. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Mehrzahl von Elektromagneten (3), die - vorzugsweise außen - an dem Behälter (2) angeordnet sind und vorzugsweise mit dem Behälter (2) unbeweglich verbunden sind, wobei die jeweilige Spule (32) der Elektromagneten (3) der Mehrzahl von Elektromagneten (3) mit der Stromquelle (4) oder mit jeweils einer weiteren Stromquelle (4) verbunden ist.
5. Vorrichtung gemäß Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mehrzahl von Elektromagneten (3) eine erste Anzahl von Elektromagneten (3) in einer ersten Ebene senkrecht zur Längsachse (L) des Behälters (2) umfasst und/oder eine zweite Anzahl von Elektromagneten (3) in einer zweiten Ebene senkrecht zur Längsachse (L) des Behälters (2) umfasst und/oder eine dritte Anzahl von Elektromagneten (3) in einer dritten Ebene senkrecht zur Längsachse (L) des Behälters (2) umfasst.
6. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Stromquelle zum Steuern der magnetischen Flussdichte regelbar ist, insbesondere ausgebildet ist, eine Erregerfrequenz zu regeln, wobei insbesondere Erregerfrequenzen von zumindest 50 Hz, bevorzugt zumindest 60 Hz, besonders bevorzugt zumindest 70 Hz und/oder Erregerfrequenzen von insbesondere höchstens 150 Hz, bevorzugt höchstens 140 Hz, besonders bevorzugt 130 Hz einstellbar sind.
7. System zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs mittels einer magnetorheologischen Flüssigkeit (1), umfassend
- eine Vorrichtung gemäß einem der vorherigen Ansprüche,
  - eine Werkstückaufnahme zum Aufnehmen eines zu bearbeitenden Werkstücks und/oder
- Werkzeugs, wobei die Werkstückaufnahme derart verfahrbar ist, dass das Werkstück und/oder das Werkzeug in einer ersten Position außerhalb des Behälterinnenraums (24) angeordnet ist und in einer zumindest zweiten Position teilweise in dem Behälterinnenraum (24), insbesondere zumindest teilweise in einer darin angeordneten magnetorheologischen Flüssigkeit (1), angeordnet ist.
8. System gemäß dem vorherigen Anspruch, **gekennzeichnet durch** zumindest eine weitere Werkstückaufnahme, zum gleichzeitigen Einbringen von zwei Werkzeugen und/oder Werkstücken in den Behälterinnenraum (24).
9. System gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine Werkstückaufnahme entlang einer Achse, vorzugsweise entlang zweier Achsen, besonders bevorzugt entlang dreier Achsen verfahrbar ist und/oder um zumindest eine Achse und/oder um zumindest zwei Achsen und/oder um zumindest drei Achsen rotierbar ist.
10. System gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **gekennzeichnet durch** einen Mehrachsroboter, vorzugsweise einen Fünf-Achs-Roboter oder einen Sechs-Achs-Roboter, wobei die zumindest eine Werkstückaufnahme an dem Mehrachsroboter angeordnet ist.
11. Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks und/oder Werkzeugs, umfassend die folgenden Schritte
- I. Bereitstellen eines Systems gemäß einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei der Behälter (2) zumindest teilweise mit einer magnetorheologischen Flüssigkeit (1) gefüllt ist,
  - II. Einsetzen, insbesondere Einspannen, eines Werkstücks und/oder Werkzeugs in eine Werkstückaufnahme, wobei die Werkstückaufnahme in einer ersten, außerhalb des Behälters (2) angeordneten Position ist,
  - III. Verfahren der Werkstückaufnahme mit eingesetztem Werkstück und/oder Werkzeug in eine zweite Position, in der das Werkstück und/oder das Werkzeug zumindest teilweise in die magnetorheologische Flüssigkeit (1) eingetaucht ist,
  - IV. Beaufschlagen der in dem Behälter (2) angeordneten magnetorheologischen Flüssigkeit (1) mit einem Magnetfeld, insbesondere durch Versorgen von zumindest einem Elektromagneten (3) mit Strom durch die Stromquelle.
12. Verfahren gemäß einem der vorherigen Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet, dass** Schritt IV eine Änderung der magnetischen Flussdichte des Magnetfelds umfasst, insbesondere durch Ändern des Stroms zum Versorgen des zumindest einen Elektromagneten (3) und oder dadurch, dass nacheinander unterschiedliche Elektromagnete der Mehrzahl von Elektromagneten (3) betrieben werden. 5

13. Verfahren gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** in Schritt IV die Elektromagneten (3) pulsierend betrieben werden, sodass sich das Magnetfeld zeitlich ändert. 10

14. Verfahren gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** - während die magnetorheologische Flüssigkeit (1) mit einem Magnetfeld beaufschlagt wird - das Werkstück und/oder Werkzeug durch die magnetorheologische Flüssigkeit (1) geführt wird, insbesondere entlang einer oder mehrerer translatorischer Achsen durch die magnetorheologische Flüssigkeit (1) geführt wird, insbesondere entlang einer helixförmigen Bahn geführt wird, und/oder in der magnetorheologischen Flüssigkeit (1) um zumindest eine Achse rotiert wird. 15  
20

15. Verfahren gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**  
vor der Durchführung von Schritt IV ein Winkel zwischen einer Werkstücklängsachse und/oder einer Werkzeuglängsachse und der Behälterlängsachse (L) eingestellt wird und/oder dass während der Durchführung von Schritt IV ein Winkel zwischen einer Werkstücklängsachse und/oder einer Werkzeuglängsachse und der Behälter (2)Längsachse (L) verändert wird. 25  
30  
35

40

45

50

55

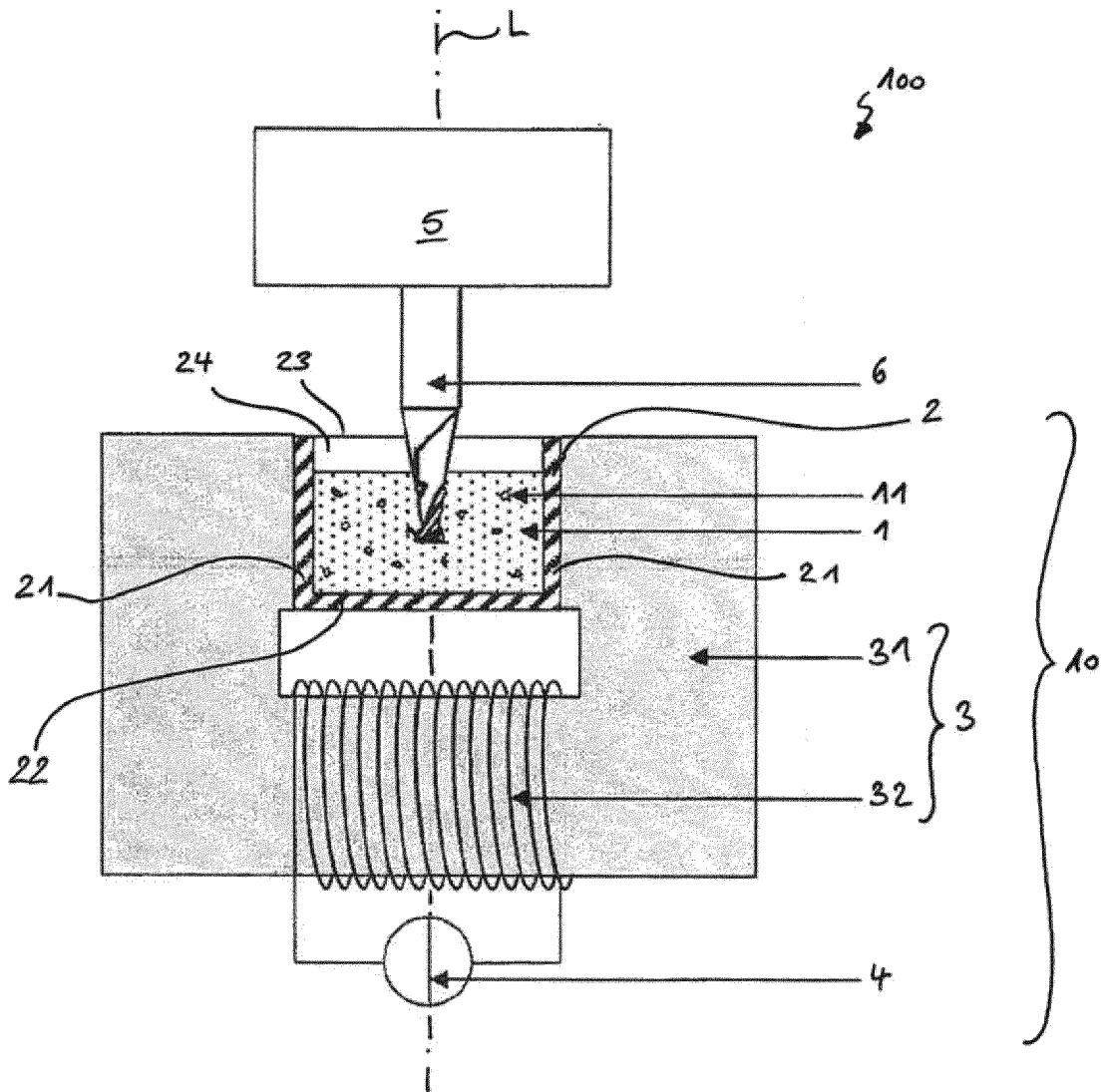
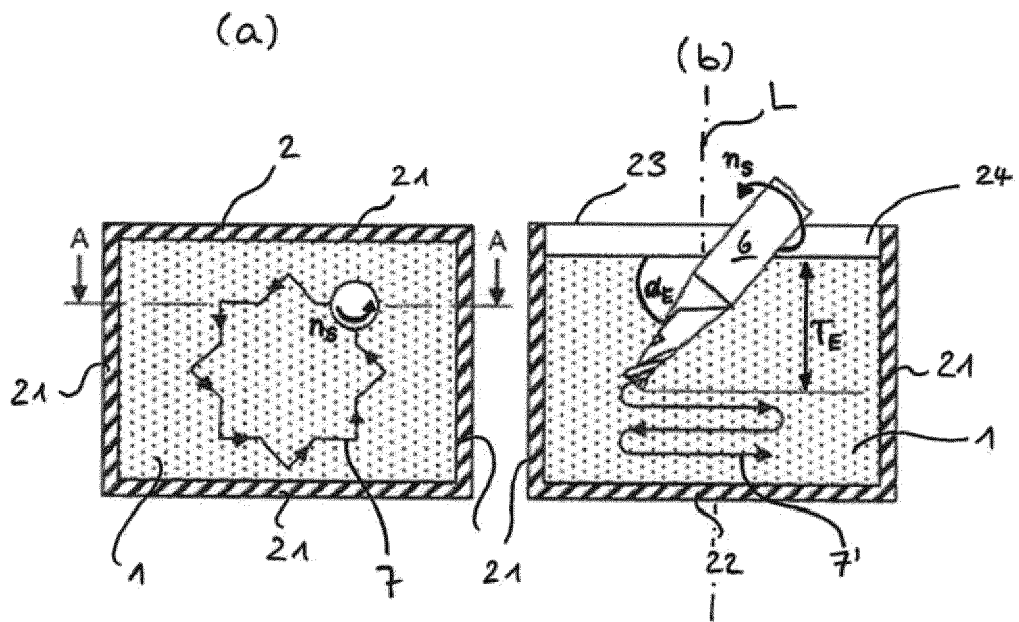


Fig. 1

Fig. 2



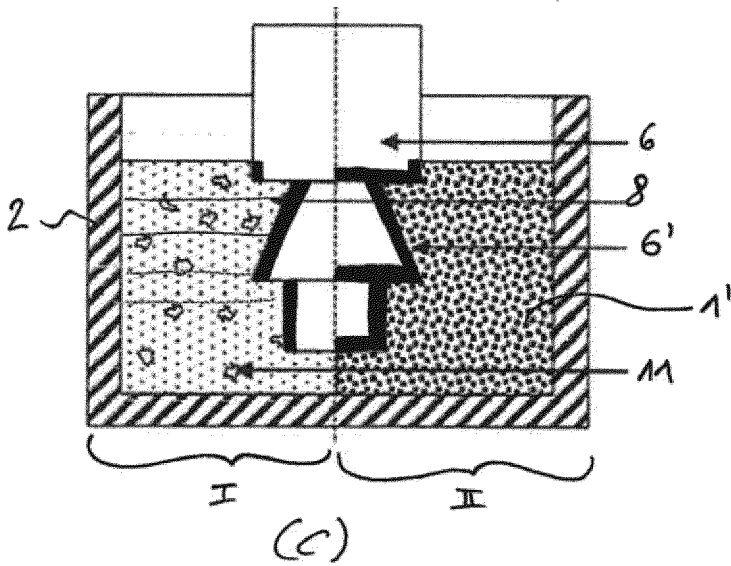


Fig. 2





Europäisches  
Patentamt  
European  
Patent Office  
Office européen  
des brevets

## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 21 19 6882

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 102 44 867 A1 (UNIV BERLIN TECH [DE]) 8. April 2004 (2004-04-08) * Absätze [0007], [0050], [0054]; Anspruch 1; Abbildungen 3A, 4 *	1-6	INV. B24B1/00 B24B31/10 B24B31/00
X	WO 94/04313 A1 (BYELOCORP SCIENT INC [US]) 3. März 1994 (1994-03-03) * Ansprüche 1-5; Abbildung 1 * * Seite 5, Zeilen 23-26 * * Seite 6, Zeilen 18-25 *	1-5, 7, 11	
X	US 2018/200862 A1 (KUNSHAN NANO NEW MATERIAL TECHNOLOGY CO., LTD) 19. Juli 2018 (2018-07-19) * Absätze [0002], [0014], [0016]; Abbildung 2 *	1-4, 6-11, 14, 15	
X	US 2017/352460 A1 (XU LIANG [CN] ET AL) 7. Dezember 2017 (2017-12-07)  * Absatz [0010]; Anspruch 1; Abbildungen 4, 5 *	1-7, 9, 11, 12, 14, 15	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)  B24B
X	US 2 787 854 A (SIMJIAN LUTHER G) 9. April 1957 (1957-04-09) * Spalte 2, Zeilen 9-20; Anspruch 1 *	1-7, 9, 11-13	
X	US 2013/273816 A1 (KAN KWOK FUNG [HK] ET AL) 17. Oktober 2013 (2013-10-17)  * Absatz [0013]; Ansprüche 1, 3; Abbildungen 1, 2 *	1-7, 9-12, 14, 15	
X	US 2 735 231 A (LUTHER G. SIMJIAN) 21. Februar 1956 (1956-02-21) * Spalte 2, Zeilen 31-39; Anspruch 1; Abbildungen 1-5 *	1-7, 9, 11-13	
2	Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt		
	Recherchenort <b>München</b>	Abschlussdatum der Recherche <b>9. Februar 2022</b>	Prüfer <b>Endres, Mirja</b>
	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 : nichtschriftliche 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		

EPO FORM 1503 03.82 (P04-C03)

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

EP 21 19 6882

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.

09-02-2022

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
<b>DE 10244867 A1</b>	<b>08-04-2004</b>	<b>KEINE</b>	
<b>WO 9404313 A1</b>	<b>03-03-1994</b>	<b>KEINE</b>	
<b>US 2018200862 A1</b>	<b>19-07-2018</b>	<b>TW 201825230 A</b> <b>US 2018200862 A1</b>	<b>16-07-2018</b> <b>19-07-2018</b>
<b>US 2017352460 A1</b>	<b>07-12-2017</b>	<b>US 2017352460 A1</b> <b>WO 2017028824 A1</b>	<b>07-12-2017</b> <b>23-02-2017</b>
<b>US 2787854 A</b>	<b>09-04-1957</b>	<b>KEINE</b>	
<b>US 2013273816 A1</b>	<b>17-10-2013</b>	<b>CN 103372806 A</b> <b>US 2013273816 A1</b>	<b>30-10-2013</b> <b>17-10-2013</b>
<b>US 2735231 A</b>	<b>21-02-1956</b>	<b>BE 545178 A</b> <b>CH 334046 A</b> <b>FR 1145775 A</b> <b>GB 789419 A</b> <b>US 2735231 A</b>	<b>09-10-1959</b> <b>15-11-1958</b> <b>29-10-1957</b> <b>22-01-1958</b> <b>21-02-1956</b>

EPO FORM P0461

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