

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
12. Februar 2009 (12.02.2009)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2009/018810 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B22D 11/115 (2006.01) **B01F 13/08** (2006.01)
B22D 27/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2008/001261

(22) Internationales Anmeldedatum:

1. August 2008 (01.08.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2007 038 281.4 3. August 2007 (03.08.2007) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **FORSCHUNGSZENTRUM DRESDEN - ROSSENDORF E.V.** [DE/DE]; Bautzner Landstrasse 128, 01328 Dresden (DE). **TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN** [DE/DE]; Mommsenstrasse 11, 01062 Dresden (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **NIKURITYUK, Petr A.** [RU/DE]; Uhlandstrasse 12, 01069 Dresden (DE). **ECKERT, Sven** [DE/DE]; Ludwig-Kugelmanstrasse 9a, 01259 Dresden (DE). **RÄBIGER, Dirk** [DE/DE]; Wittenberger Str. 56b, 01309 Dresden (DE). **WILLERS, Bernd** [DE/DE]; Seidnitzer Str. 10, 01069 Dresden (DE). **ECKERT, Kerstin** [DE/DE]; Ludwig-Kugelman-Str. 9a, 01259 Dresden (DE). **GRUNDMANN, Roger** [DE/DE]; Am Marktsteig 1, 01729 Bannewitz (DE). **GERBETH, Gunter** [DE/DE]; Schulstr. 11, 01328 Dresden (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **FORSCHUNGSZENTRUM DRESDEN - ROSSENDORF E.V.**; Postfach 51 01 19, 01314 Dresden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR THE ELECTROMAGNETIC STIRRING OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE FLUIDS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND EINRICHTUNG ZUM ELEKTROMAGNETISCHEN RÜHREN VON ELEKTRISCH LEITENDEN FLÜSSIGKEITEN

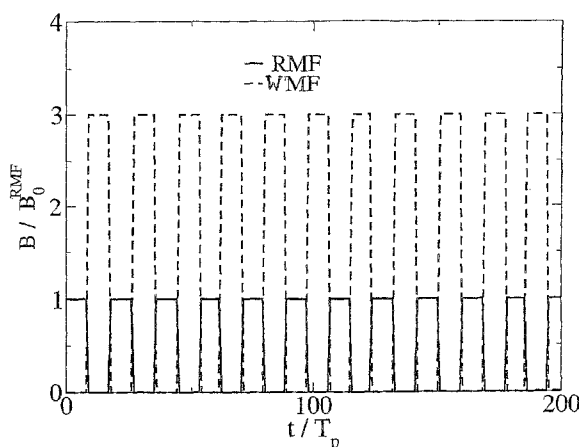


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a method and to a device for the electromagnetic stirring of electrically conductive fluids (2), using a magnetic field RMF (34) rotating in the horizontal plane and a magnetic field WMF (47) migrating in the vertical direction relative thereto. The aim is to avoid non-symmetrical flow structures in receptacles filled with melts, particularly at the onset and during the course of solidification. In addition, effective mixing of the fluid and/or controlled solidification of metal alloys are to be achieved, while avoiding the formation of segregation zones in the solidifying structure. The solution is that both the rotating magnetic field RMF (34) and the migrating magnetic field WMF (47) are discontinuously connected in the form of temporally limited and adjustable period durations ($T_{P,RMF}$, $T_{P,WMF}$) and alternately, consecutively in time, via associated induction coils (31, 32, 33; 41, 42, 43, 44, 45, 46).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/018810 A1



IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten (2) unter Verwendung eines in der horizontalen Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF (34) und eines dazu in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF (47). Die Aufgabe besteht darin, dass unsymmetrische Strömungsstrukturen in mit Schmelzen gefüllten Behältern, insbesondere zu Beginn und während des Verlaufs der Erstarrung vermieden werden. Ausserdem sollen eine effektive Durchmischung der Flüssigkeit und/oder eine kontrollierte Erstarrung metallischer Legierungen unter Vermeidung der Ausbildung von Entmischungszonen im Erstarrungsgefüge erreicht werden. Die Lösung besteht darin, dass sowohl das rotierende Magnetfeld RMF (34) als auch das wandernde Magnetfeld WMF (47) diskontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten und einstellbaren Periodendauern ($T_{P, RMF}$, $T_{P, WMF}$) und abwechselnd zeitlich nacheinander über zugehörige Induktionsspulen (31, 32, 33; 41, 42, 43, 44, 45, 46) zugeschaltet werden.

5

10

15

20

25 Verfahren und Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten unter Verwendung eines in
30 horizontaler Ebene rotierenden Magnetfeldes und eines dazu in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes.

Aufgrund ihrer kontaktlosen Wechselwirkung mit elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten eröffnen zeitabhängige elektromagnetische Felder eine attraktive Möglichkeit zum Rühren von heißen Metallschmelzen oder Halbleiterschmelzen. Über die Parameter Magnetfeldamplitude und Magnetfeldfrequenz kann das elektromagnetische Kraftfeld in einfacher Weise unmittelbar und genau geregelt werden.

Das elektromagnetische Rühren wird im industriellen Maßstab u.a. bei der gerichteten Erstarrung von metallischen Legierungen oder Halbleiterschmelzen angewendet. In diesem Zusammenhang besteht ein wesentliches Problem darin, dass Strömungen in unmittelbarer Umgebung einer voranschreitenden Erstarrungsfront zu Entmischungen im erstarrten Material führen können, welche die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Festkörpers merklich verschlechtern. Aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeit einzelner Komponenten in der flüssigen bzw. festen Phase entsteht eine Konzentrationsgrenzschicht an der Erstarrungsfront. Durch den konvektiven Transport der angereicherten Schmelze von der Erstarrungsfront weg wirkt eine Strömung dem Aufbau einer ausgedehnten Konzentrationsgrenzschicht entgegen. Strömt die Schmelze dabei ausschließlich in eine Richtung, kommt es aber in anderen Volumenbereichen zu Entmischungszonen.

Rotierende oder wandernde Magnetfelder kommen bereits in metallurgischen Prozessen, wie dem Stranggießen von Stahl zum Einsatz. Zum Beispiel ist eine Anordnung einer mehrphasigen elektromagnetischen Wicklung zur Erzeugung eines Wanderfeldes senkrecht zur Gießrichtung an einer Stranggießanlage in der Druckschrift DE AS 1 962 341 beschrieben.

Ein anderes Verfahren zum Rühren der Stahlschmelze beim Stranggießen ist in der Druckschrift US 2003/0106667 beschrieben, bei dem zwei übereinander angeordnete und gegenläufig rotierende Magnetfelder eingesetzt werden. Während das untere Magnetfeld die eigentliche Funktion des Rührers übernimmt, kommt dem oberen Magnetfeld die Aufgabe zu, die rotierende Schmelze im Bereich der freien Oberfläche auf sehr kleine Geschwindigkeitswerte abzubrem-

sen, um die negativen Auswirkungen des Rührens - eine Auslenkung und Verwirbelung der freien Oberfläche - zu kompensieren.

Ein Problem besteht darin, dass mit zwei Magnetrührern - dem oberflächenbezogenen oberen Magnetprüher und dem volumenbezogenen unteren Magnetprüher - gearbeitet werden muss. Mit Hilfe des unteren Magnetprühers wird mechanische Energie in die Stahlschmelze gebracht und die Stahlschmelze in Rotation versetzt. Da aber im oberen Bereich der Stranggussanlage eine weit weniger intensive Rotation der Schmelze vorgesehen ist, muss zusätzliche Energie im oberen Magnetprüher aufgewendet werden, um die Strömung dort zu bremsen.

Weitere Verfahren zum elektromagnetischen Rühren in Stranggusskokillen sind in den Druckschriften DE 2 401 145 und DE 3 730 300 beschrieben, bei denen eine periodische Änderung des Stromes in der Spulenordnung vorgenommen wird. In der Druckschrift DE 2 401 145 ist beschrieben, dass mit der periodischen Änderung die Ausbildung von sekundären Weißbändern und Sekundär dendriten vermieden werden kann. In der Druckschrift DE 3 730 300 ist ein Verfahren zur Beruhigung der freien Badoberfläche beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass das resultierende Magnetfeld im Innern der Schmelze gleichzeitig eine intensive Rührbewegung aufrechterhält. In den beiden genannten Druckschriften werden für die Zykluszeiten, in denen die Stromrichtung gewechselt werden soll, sehr weite Bereiche, namentlich zwischen 1 und 30 s angegeben. Diese Zykluszeit oder Periodendauer bzw. die Frequenz des Vorzeichenwechsels des Stroms ist ein wichtiger Parameter mit großem Einfluss auf die sich ausbildende Strömung. Beide Druckschriften geben aber keine Vorgaben hinsichtlich einer Periodendauer in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke, der Geometrie der Anordnung oder den Materialeigenschaften der Metallschmelze an.

Eine Einrichtung und ein Verfahren zum intensiven Rühren einer in einem zylindrischen Behälter befindlichen Schmelze, bei dem ein rotierendes Magnetfeld und ein wanderndes Magnetfeld gleichzeitig eingesetzt werden, sind in der Druckschrift JP2003220323 beschrieben. Das rotierende Magnetfeld wird von

einer den Behälter umgebenden Radialspule, deren Windungen ringförmig ausgebildet sind, erzeugt, das wandernde Magnetfeld wird von einer Längsspule, deren Windungen sich in einer axialen Richtung mantelabschnittsweise ausdehnen und insgesamt ringförmig den Behältermantel umgeben, erzeugt, wobei die

5 Längsspule zwischen dem Behältermantel und der Radialspule angeordnet ist. Die Radialspule erzeugt eine Rotationsbewegung und die Längsspule erzeugt eine Axialbewegung der flüssigen Schmelze im Behälter. Die gleichzeitige Überlagerung beider Felder erzeugt eine resultierende, stationäre Kraft, die charakteristische und je nach Parameterwahl unter Umständen auch unsymmetrische

10 Strömungsstrukturen hervorruft. Für die Erstarrung bedeutet dies, dass an der Erstarrungsfront Strömungen dominieren, die im zeitlichen Mittel einen Stofftransport in bevorzugte Richtungen und damit Entmischungen verursachen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Einrichtung

15 zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten anzugeben, die derart geeignet ausgebildet sind, dass unsymmetrische Strömungsstrukturen in mit Schmelzen gefüllten Behältern, insbesondere zu Beginn und während des Verlaufs der Erstarrung vermieden werden. Außerdem sollen eine effektive Durchmischung der Flüssigkeit und/oder eine kontrollierte Erstarrung

20 metallischer Legierungen unter Vermeidung der Ausbildung von Entmischungszonen im Erstarrungsgefüge erreicht werden.

Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der Ansprüche 1 und 10 gelöst.

In dem Verfahren zum elektromagnetischen Rühren elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten unter Verwendung eines in horizontaler Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF und eines dazu in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF,

25 WMF,

werden gemäß dem Kennzeichenteil des Patentanspruchs 1 sowohl das rotierende Magnetfeld RMF als auch das wandernde Magnetfeld

30 WMF diskontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten und einstellbaren Periodendauern $T_{P, RMF}$ und $T_{P, WMF}$ und abwechselnd zeitlich nacheinander zugeschaltet.

Die Dauer $T_{P,RMF}$ der Perioden des rotierenden Magnetfeldes RMF und die Dauer $T_{P,WMF}$ der Perioden des wandernden Magnetfeldes WMF können in einem Zeitintervall

$$0.2 \cdot t_{i.a.} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i.a.} \quad (I)$$

5 liegen mit folgender Definition für die Einstellzeit $t_{i.a.}$

$$t_{i.a.} = C_g \cdot \left(B_0 \sqrt{\frac{\sigma \omega}{\rho}} \right)^{-1} \quad (III)$$

wobei die Variablen σ , ρ , ω und B_0 die elektrische Leitfähigkeit und die Dichte der Flüssigkeit, die Frequenz und die Amplitude des Magnetfeldes RMF oder WMF bezeichnen, während die Konstante C_g den Einfluss von Größe und Form
 10 des Volumens der Flüssigkeit beschreibt und Zahlenwerte zwischen Drei und Fünf annehmen kann. Die Einstellzeit $t_{i.a.}$ bezeichnet den Zeitpunkt, an dem die volumengemittelte kinetische Energie der meridionalen Strömung oder die volumengemittelte meridionale Geschwindigkeit U_{rz} ein erstes Maximum erreicht, wie in der Druckschrift Nikrityuk, Ungarish, Eckert, Grundmann: Spin-up of a
 15 liquid metal flow driven by a rotating magnetic field in a finite cylinder: A numerical and an analytical study, Phys Fluids 17, 067101-1 bis 067101-16, 2005, beschrieben ist. Dabei gelten folgende Gleichungen

$$\left. \frac{\partial U_{rz}}{\partial t} \right|_{t=t_{i.a.}} = 0 \quad (IV)$$

$$20 \quad U_{rz} = \frac{2 \int_0^{H_0 R_0} \int_0^{H_0 R_0} \sqrt{u_z^2 + u_r^2} \, r \, dr dz}{H_0 R_0^2} \quad (V)$$

Im Fall des Rotationsmagnetfeldes RMF ist die sogenannte Einstellzeit $t_{i.a.}$ (engl. initial adjustment time) mit der Zeitskala identisch, in der sich nach einem abrupten Zuschalten eines rotierenden Magnetfeldes in einer Schmelze, die sich zu-
 25 vor im Ruhezustand befand, der für die meridionale Sekundärströmung typische Doppelwirbel herausbildet.

Verschiedene Periodendauern $T_{P,RMF}, T_{P,WMF}$ können für das rotierende und wandernde Magnetfeld gemäß folgender Bedingung

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II)$$

eingestellt werden.

5

In den Behälter kann als elektrisch leitende Flüssigkeit metallische oder Halbleiterschmelze gefüllt werden.

Im Zustand einer temperaturkontrolliert gerichteten Erstarrung ist die Amplitude B_0^{RMF} des rotierenden Magnetfeldes RMF so zu erhöhen, dass mindestens das Maximum der beiden Werte

$$B_1^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{100 \cdot V_{sol}}{H_0} \quad (VI) \quad \text{und}$$

$$B_2^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{40 \cdot V_{sol}^{3/2}}{\sqrt{H_0 \nu}} \quad (VII)$$

erreicht wird, wobei die Parameter ν , V_{sol} und H_0 die kinematische Viskosität der Schmelze, die Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. die Höhe des Schmelzenvolumens darstellen.

B_1^{RMF} und B_2^{RMF} sind die unteren Grenzwerte der Amplituden der rotierenden Magnetfeldes, die sich im Verlauf der Erstarrung in Abhängigkeit der Parameter ν , V_{sol} und H_0 verändern können.

20

Die Amplitude B_0^{WMF} des wandernden Magnetfeldes WMF kann genauso groß oder bis zu viermal größer als die Amplitude B_0^{RMF} des rotierenden Magnetfeldes RMF eingestellt werden, d.h.

$$B_0^{WMF} = 1 \dots 4 \cdot B_0^{RMF} \quad (VIII)$$

25

Bei der Modulierung des Verlaufs der Lorentzkraft F_L können anstelle der Rechteckfunktion andere Pulsformen, wie beispielsweise Sinus, Dreieck oder Sägezahn, realisiert werden, wobei der Verlauf und der Maximalwert des Magnetfeldes RMF oder WMF so festgelegt werden, dass sich für die verschiedenen Pulsformen ein identischer Energieeintrag ergibt.

30

Die Amplituden B_0^{RMF} , B_0^{WMF} der Magnetfelder RMF oder WMF können während des Rührens kontinuierlich entsprechend den sich aus dem zu betrachtenden Prozess ableitenden Anforderungen angepasst eingestellt werden.

5

Die einzelnen Perioden $T_{\text{P,RMF}}$ und $T_{\text{P,WMF}}$, in denen eines der Magnetfelder RMF oder WMF zugeschaltet ist, können durch eine Pausendauer T_{Pause} , in denen keines der beiden Magnetfelder RMF oder WMF auf die Flüssigkeit einwirkt, unterbrochen werden, wobei $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,RMF}}$ oder $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,WMF}}$ eingestellt werden können.

10

Die Richtung des rotierenden Magnetfeldes RMF und/oder WMF kann zwischen zwei Pulsen invertiert werden.

15 Die Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten enthält zumindest

- einen zylindrischen Behälter,
- eine den Behälter umgebende zentralsymmetrische Anordnung von mindestens drei Paaren von Induktionsspulen zur Ausbildung eines eine Lorentzkraft F_L erzeugenden, in horizontaler Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF, und
- eine den Behälter umgebende Anordnung von mindestens zwei stapelartig übereinander gereihten Induktionsspulen zur Ausbildung eines in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF und
- 25 - mindestens einen Temperatursensor zur Temperaturmessung der Flüssigkeit im Behälter und Temperaturkontrolle seitens einer Steuer-/Regeleinheit,

25

wobei gemäß dem Kennzeichenteil des Patentanspruchs 10 eine Stromversorgungseinheit zu den Induktionsspulen mit der Steuer-/Regeleinheit verbunden ist, wobei die Stromzufuhr zu den jeweils zugehörigen Induktionsspulen mit den vorgegebenen Bedingungen

30

$$0.2 \cdot t_{i,a} < T_{\text{P,RMF}} = T_{\text{P,WMF}} < 2 \cdot t_{i,a} \quad (\text{I}) \text{ oder}$$

$$0.5 \cdot T_{\text{P,RMF}} < T_{\text{P,WMF}} < 5 \cdot T_{\text{P,RMF}} \quad (\text{II})$$

eingestellt erfolgt.

Der Behälter mit der Flüssigkeit bzw. flüssigen Schmelze kann konzentrisch innerhalb der Induktionsspulen angeordnet sein.

5

Der Behälter kann mit einer Heizeinrichtung und/oder Kühleinrichtung versehen sein.

10 Der Bodenplatte des Behälters kann in direktem Kontakt mit einem festen Metallkörper stehen, welcher im Innern von einem Kühlmedium durchflossen wird.

Die Seitenwände des Behälters können thermisch isoliert sein.

Der Kühlkörper kann mit einem Thermostaten in Verbindung stehen.

15

Zwischen dem Kühlkörper und dem Behälter kann sich ein Flüssigmetallfilm befinden, um einen stabilen Wärmeübergang bei geringem Übergangswiderstand zu erzielen.

20 Der Flüssigmetallfilm kann aus einer Galliumlegierung bestehen.

25 In der Bodenplatte und/oder in/an den Seitenwänden des Behälters, in dem sich die Schmelze befindet, kann mindestens ein Temperatursensor in Form eines Thermoelements positioniert sein, welches eine Information über den Zeitpunkt des Beginns der Erstarrung liefert und mit der Steuer-/Regeleinheit zur Temperaturkontrolle der Flüssigkeit verbunden ist.

30 Eine Verwendung der Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten nach den Ansprüchen 10 bis 18 kann in Form von metallischen Schmelzen in metallurgischen Prozessen oder in Form von Halbleiterschmelzen in der Kristallzüchtung, zur Reinigung von Metallschmelzen, im Stranggießen oder im Prozess der Erstarrung metallischer Werkstoffe mittels des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 9 erfolgen.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum elektromagnetischen Rühren elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten wird sowohl das rotierende als auch das dazu vertikal wandernde Magnetfeld RMF und WMF diskontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten Pulsen zugeschaltet, wobei beide Magnetfelder RMF und WMF abwechselnd und zeitlich nacheinander zugeschaltet werden. Die mit einem Dreiphasenwechselstrom gespeisten Induktionsspulenpaare werden also derart angesteuert, dass zu jeder Zeit ein Magnetfeld RMF oder WMF auf die Schmelze wirkt.

10

Die Periodendauer $T_{P,RMF}$ des rotierenden Magnetfeldes RMF und die Periodendauer $T_{P,WMF}$ des wandernden Magnetfeldes WMF können auf einen gleichen Wert eingestellt werden und es erfolgt erfindungsgemäß eine Einstellung nach folgender Bedingung

15
$$0.2 \cdot t_{i.a.} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i.a.} \quad (I).$$

Sind die Periodendauer $T_{P,RMF}$ des rotierenden Magnetfeldes RMF und die Periodendauer $T_{P,WMF}$ des wandernden Magnetfeldes WMF auf einen zueinander unterschiedlichen Wert eingestellt, dann erfolgt eine Einstellung nach folgender Bedingung:

20

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II).$$

Vorzugsweise ist die Periodendauer $T_{P,WMF}$ des wandernden Magnetfeldes WMF größer oder um ein mehrfaches größer, um eine intensive Durchmischung zu erreichen.

25

Die Amplitude $B_{P,WMF}$ des vertikal wandernden Magnetfeldes WMF kann mindestens genauso groß sein wie die Amplitude $B_{P,RMF}$ des rotierenden Magnetfeldes RMF, vorzugsweise ist sie um ein mehrfaches (maximal 4-fach) größer.

30 Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels mittels mehrerer Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Einrichtung zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten mit kombinierten Magnetfeldern,
- 5 Fig. 2 ein Schema zur Modulation zwischen den Magnetfelder RMF und WMF in Form eines (B/B_0) -(t/T_P)-Diagramms zwischen relativem Rotationsmagnetfeld $B/B_0^{\text{RMF}} = 1$ bzw. relativem Wandermagnetfeld $B/B_0^{\text{WMF}} = 3$ und relativer Periodendauer t/T_P ,
- 10 Fig. 3 schematische Darstellungen - Momentaufnahmen - der Flüssigkeitsströmungen bei $B_0^{\text{RMF}}/B_0^{\text{WMF}} = 1,67$, $Ta = 1,06 \cdot 10^5$, $T_P = 8,6s = 0,5 \cdot t_{i.a.}$, wobei
- $$Ta = \frac{\sigma B_0^2 \omega R_0^4}{2\mu\nu} \quad \text{die Taylor-Zahl darstellt und}$$
- 15 Fig. 3a1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das rotierende Magnetfeld RMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF ausgeschaltet ist,
- 20 Fig. 3a2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das rotierende Magnetfeld RMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF ausgeschaltet ist,
- 25 Fig. 3b1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das wandernde Magnetfeld WMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF ausgeschaltet ist,
- 30 Fig. 3b2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das wandernde Magnetfeld WMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF ausgeschaltet ist,
- zeigen,

- Fig. 4 schematische Darstellungen - Momentaufnahmen - der Flüssigkeitsströmungen bei $B_0^{\text{RMF}}/B_0^{\text{WMF}} = 3$, $T_a = 1,06 \cdot 10^5$, $T_p = 8,6\text{s} = 0,5 \cdot t_{i,a.}$, wobei
- 5 Fig. 4a1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das rotierende Magnetfeld RMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF ausgeschaltet ist,
- 10 Fig. 4a2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das rotierende Magnetfeld RMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF ausgeschaltet ist,
- 15 Fig. 4b1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das wandernde Magnetfeld WMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF ausgeschaltet ist,
- 20 Fig. 4b2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das wandernde Magnetfeld WMF eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF ausgeschaltet ist, zeigen,
- Fig. 5 mehrere schematische Darstellungen der Erstarrung einer Al-Si-Legierung unter Magnetfeldeinfluss - Makrogefüge, die entsprechenden Magnetfelder werden 30 s nach Beginn der Erstarrung zugeschaltet -, wobei
- 25 Fig. 5a ein Makrogefüge unter Einfluss eines kontinuierlich wirkenden wandernden Magnetfeldes WMF bei 6mT,
- 30 Fig. 5b ein Makrogefüge unter Einfluss eines kontinuierlich wirkenden rotierenden Magnetfeldes RMF bei 6,5mT und
- Fig. 5c ein Makrogefüge unter Einfluss der diskontinuierlich und abwechselnd einwirkenden Magnetfelder RMF und WMF mit jeweils 6mT.

zeigen.

In Fig.1 ist in einer schematischen Darstellung eine Einrichtung 1 zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten 2 gezeigt, die zu-

5 mindest enthält

- einen zylindrischen Behälter 14,
 - eine den Behälter 14 umgebende zentralsymmetrische Anordnung 3 von mindestens drei Paaren 31,32,33 von Induktionsspulen zur Ausbildung eines Lorentzkraft F_L erzeugenden, in horizontaler Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF 34, und

10 RMF 34, und

- eine den Behälter 14 umgebende Anordnung 4 von die Symmetrieachse 15 koaxial umgebenden stapelartig übereinandergereihten Induktionsspulen 41,42,43,44,45,46 zur Ausbildung eines in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF 47 sowie

15 - mindestens einen Temperatursensor 8 zur Temperaturmessung der Flüssigkeit 2 im Behälter 14 und Temperaturkontrolle seitens einer Steuer-/Regeleinheit 10.

Erfindungsgemäß ist die Stromversorgungseinheit 9 zu den jeweils zugehörigen Induktionsspulen 31,32,33;41,42,43,44,45,46 mit der Steuer-/Regeleinheit 10 verbunden, wobei eine Stromzufuhr zu den Induktionsspulen 31,32,33; 41,42,43,44,45,46 mit den vorgegebenen Bedingungen

$$0.2 \cdot t_{i,a.} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i,a.} \quad (I) \text{ oder}$$

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II)$$

25 eingestellt erfolgt.

Der Behälter 14 befindet sich zentralsymmetrisch inmitten einer Anordnung 3 von Paaren 31,32,33 von Induktionsspulen zur Erzeugung eines rotierenden Magnetfeldes RMF 34 und einer Anordnung 4 von Induktionsspulen 41,42,43,44,45,46 eines wandernden Magnetfeldes WMF 47. Die Induktionsspulenpaare 31,32,33 und die koaxial zur Symmetrieachse 15 stapelartig übereinandergereihten Induktionsspulen 41,42,43,44,45,46 sind jeweils mit der Stromversorgungseinheit 9 verbunden und werden von dort mit einem Strom I_D

30

in Form eines 3-Phasenwechselstroms gespeist und erzeugen ein um die Symmetrieachse 15 der Einrichtung 1 rotierendes, horizontal ausgerichtetes Magnetfeld RMF 34 bzw. ein längs der Symmetrieachse 15 ausgerichtetes, in vertikaler Richtung wanderndes Magnetfeld WMF 47. Die Stromversorgungseinheit 9 ist mit der elektronischen Steuer-/Regeleinheit 10 verbunden, welche in vorgegebenen Abständen ein Zu- und Abschalten des 3-Phasenwechselstromes I_D bewirkt. Das Zu- und Abschalten der Magnetfelder RMF 34 und WMF 47 wird in der Steuer-/Regeleinheit 10 so gesteuert, dass zu jeder Zeit maximal nur ein Magnetfeld RMF 34 oder WMF 47 auf die Schmelze 2 wirkt.

10

Die Einrichtung 1 des mit der elektrisch leitfähigen Schmelze 2 gefüllten zylindrischen Behälters 14 kann mit einer Kühleinrichtung 11 für die Erstarrung metallischer Schmelzen 2 ergänzt sein. Die Kühleinrichtung 11 enthält einen Metallblock 5, in dessen Innern Kühlkanäle 6 vorhanden sind. Der Behälter 14 steht mit seiner Bodenplatte 12 auf dem Metallblock 5. Die im Innern des Metallblocks 5 befindlichen Kühlkanäle 6 werden während des Erstarrungsprozesses von einem Kühlmittel durchflossen. Mittels der Kühleinrichtung 11 wird der Schmelze 2 die Wärme nach unten entzogen. Eine thermische Isolierung 7 des Behälters 14 verhindert Wärmeverluste in radialer Richtung. An der Bodenplatte 12 und/oder in/an den Seitenwänden 13 des Behälters 14 ist mindestens ein Temperatursensor 8 z.B. in Form eines Thermoelements zur Temperaturkontrolle angebracht. Die Temperaturmessungen ermöglichen eine Überwachung des flüssigen Zustandes, des Beginns und des Verlaufs des Zustandes der Erstarrung und ermöglichen eine zeitnahe Anpassung der Magnetfeldparameter, z.B. B_0^{RMF} , B_0^{WMF} und der Periodendauer T_P , durch die mittels der Steuer-/Regeleinheit 10 gesteuerte Stromversorgungseinheit 9 an die einzelnen Stadien des Erstarrungsprozesses.

Der Behälter 14 mit der Schmelze 2 ist konzentrisch innerhalb der Induktionsspulen 31,32,33;41,42,43,44,45,46 angeordnet.

Der Behälter 14 kann mit einer Heizeinrichtung und/oder Kühleinrichtung 11 versehen sein.

Die Bodenplatte 12 steht in direktem Kontakt mit einem festen Metallkörper 5, welcher im Innern von einem Kühlmedium durchflossen wird.

- 5 Die Seitenwände 13 des Behälters 14 sind durch einen Isolationsmantel 7 thermisch isoliert.

Der Kühlkörper 5 steht mit einem Thermostaten (nicht eingezeichnet) in Verbindung.

10

Zwischen dem Kühlkörper 5 und dem Behälter 14 kann sich ein Flüssigmetallfilm (nicht eingezeichnet) befinden, um einen stabilen Wärmeübergang bei geringem Übergangswiderstand zu erzielen.

Der Flüssigmetallfilm kann aus einer Galliumlegierung bestehen.

15

In der Bodenplatte 12 und/oder in/an den Seitenwänden 13 des Behälters 14, in dem sich die Schmelze 2 befindet, ist ein Temperatursensor 8 in Form eines Thermoelements positioniert, welches eine Information über den Zeitpunkt des Beginns der Erstarrung liefert und mit der Steuer-/Regeleinheit 10 verbunden ist.

20

In Fig. 2 ist ein Schema zur Modulation RMF-WMF in Form eines Diagramms zwischen relativem rotierendem Magnetfeld $B/B_0^{\text{RMF}} = 1$ bzw. relativem wanderndem Magnetfeld $B/B_0^{\text{WMF}} = 3$ und relativer Periodendauer t/T_P dargestellt.

- 25 In diesem Beispiel ist jeweils die zeitliche Abfolge von RMF und WMF dargestellt, wobei die Amplitude des wandernden Magnetfeldes B_0^{WMF} das Dreifache der Amplitude des rotierenden Magnetfeldes B_0^{RMF} beträgt und gleiche Periodendauern $T_{P,\text{RMF}}$ und $T_{P,\text{WMF}}$ gewählt sind.

- 30 Durch das Verfahren zum elektromagnetischen Rühren der elektrisch leitfähigen Flüssigkeit 2 unter Verwendung eines in der horizontalen Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF 34 und eines in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF 47 werden erfindungsgemäß, wie in Fig. 2 gezeigt ist, sowohl das rotierende Magnetfeld RMF 34 als auch das wandernde Magnetfeld WMF 47 dis-

kontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten und einstellbaren Periodendauern $T_{P,RMF}$ und $T_{P,WMF}$ und abwechselnd zeitlich nacheinander erzeugt.

- Die Dauer $T_{P,RMF}$ der Perioden von rotierendem Magnetfeld RMF 34 und die
 5 Dauer $T_{P,WMF}$ der Perioden von wanderndem Magnetfeld WMF 47 können in einem Zeitintervall

$$0.2 \cdot t_{i.a.} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i.a.} \quad (I)$$

liegen, mit folgender Definition für die charakteristische Einstellzeit $t_{i.a.}$.

$$t_{i.a.} = C_g \cdot \left(B_0 \sqrt{\frac{\sigma \omega}{\rho}} \right)^{-1} \quad (III)$$

- 10 wobei die Variablen σ , ρ , ω und B_0 die elektrische Leitfähigkeit und die Dichte der Flüssigkeit, die Frequenz und die Amplitude des Magnetfeldes RMF und WMF bezeichnen, während die Konstante C_g den Einfluss von Größe und Form des Volumens der Flüssigkeit beschreibt und Zahlenwerte zwischen Drei und Fünf annehmen kann. Die Einstellzeit $t_{i.a.}$ bezeichnet den Zeitpunkt, an dem die
 15 volumengemittelte kinetische Energie der meridionalen Strömung oder die volumengemittelte meridionale Geschwindigkeit U_{rz} ein erstes Maximum erreicht.

- Bei vorhandenen verschiedenen Periodendauern $T_{P,RMF}$, $T_{P,WMF}$ für das rotierende Magnetfeld RMF 34 und das wandernde Magnetfeld WMF 47 kann gemäß
 20 folgender Bedingung

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II)$$

eingestellt werden,

- Im Zustand einer temperaturkontrolliert gerichteten Erstarrung ist die Amplitude
 25 B_0^{RMF} des rotierenden Magnetfeldes RMF 34 so zu erhöhen, dass mindestens das Maximum der beiden Werte

$$B_1^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{100 \cdot V_{sol}}{H_0} \quad (VI) \quad \text{und}$$

$$B_2^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{40 \cdot V_{sol}^{3/2}}{\sqrt{H_0 \nu}} \quad (VII)$$

erreicht werden, wobei die Parameter ν , V_{sol} und H_0 die kinematische Viskosität der Schmelze 2, die Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. die Höhe des Schmelzenvolumens darstellen.

- 5 Die Amplitude B_0^{WMF} des wandernden Magnetfeldes WMF 47 kann genauso groß oder bis zu viermal größer als die Amplitude B_0^{RMF} des rotierenden Magnetfeldes RMF 34 eingestellt werden, d.h.

$$B_0^{\text{WMF}} = 1 \dots 4 \cdot B_0^{\text{RMF}} \quad (\text{VIII})$$

- 10 Die Amplituden B_0^{RMF} , B_0^{WMF} der Magnetfelder RMF 34 und WMF 47 können während des Rührens kontinuierlich entsprechend den sich aus dem zu betrachtenden Prozess ableitenden Anforderungen angepasst werden.

- Die einzelnen Periodendauern $T_{\text{P,RMF}}$ und $T_{\text{P,WMF}}$, in denen eines der Magnetfelder RMF 34 oder WMF 47 zugeschaltet ist, können durch eine Pausendauer T_{Pause} , in denen keines der beiden Magnetfelder auf die Flüssigkeit 2 einwirkt, unterbrochen werden, wobei $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,RMF}}$ oder $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,WMF}}$ sind.
- 15

- Die Richtung des rotierenden Magnetfeldes RMF 34 und/oder des wandernden Magnetfeldes WMF 47 kann zwischen zwei Pulsen invertiert werden.
- 20

In Fig. 3 sind schematische Darstellungen - Momentaufnahmen - der Flüssigkeitsströmungen bei $B_0^{\text{RMF}}/B_0^{\text{WMF}} = 1,67$, bei der Taylor-Zahl $Ta = 1,06 \cdot 10^5$, $T_P = 8,6\text{s} = 0,5 \cdot t_{\text{i.a.}}$ gezeigt, wobei

- 25 Fig. 3a1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das rotierende Magnetfeld RMF 34 eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF 47 ausgeschaltet ist,

- Fig. 3a2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das rotierende Magnetfeld RMF 34 eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF 47 ausgeschaltet ist,
- 30

Fig. 3b1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das wandernde Magnetfeld WMF 47 eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF 34 ausgeschaltet ist und

Fig. 3b2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das wandernde Magnetfeld WMF 47 eingeschaltet ist und das rotierende Magnetfeld RMF 34 ausgeschaltet ist.

Der Vergleich zeigt, dass die meridionale Strömung am Boden des Zylinders
5 beim eingeschalteten WMF 47 geschwächt ist, was zur Verringerung der Entmischung führt.

In Fig. 4 sind schematische Darstellungen in Form von Momentaufnahmen der Flüssigkeitsströmungen bei $B_0^{\text{RMF}}/B_0^{\text{WMF}} = 3$, $Ta = 1,06 \cdot 10^5$, $T_P = 8,6s = 0,5 t_{i.a.}$
10 gezeigt, wobei

Fig. 4a1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das rotierende Magnetfeld RMF 34 eingeschaltet ist und gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF 47 ausgeschaltet ist,

Fig. 4a2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das rotierende Magnetfeld RMF 34 eingeschaltet ist und
15 gleichzeitig das wandernde Magnetfeld WMF 47 ausgeschaltet ist,

Fig. 4b1 eine Momentaufnahme der azimuthalen Strömung, wenn das wandernde Magnetfeld WMF 47 eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF 34 ausgeschaltet ist und

20 Fig. 4b2 eine Momentaufnahme der meridionalen Geschwindigkeit als Vektordiagramm, wenn das wandernde Magnetfeld WMF 47 eingeschaltet ist und gleichzeitig das rotierende Magnetfeld RMF 34 ausgeschaltet ist, zeigen.

In Fig. 5 sind mehrere schematische Darstellungen der Erstarrung einer Al-Si-Legierung unter Magnetfeldeinfluss in Form des Makrogefüges im vertikalen Schnitt gezeigt, wobei

Fig. 5a ein Makrogefüge unter Einfluss eines kontinuierlich wirkenden wandernden Magnetfeldes WMF 47 bei 6mT,

Fig. 5b ein Mikrogefüge unter Einfluss eines kontinuierlich wirkenden rotierenden Magnetfeldes RMF 34 bei 6,5mT und
30

Fig. 5c ein Mikrogefüge unter Einfluss der diskontinuierlich und abwechselnd einwirkenden Magnetfelder RMF 34 und WMF 47 mit jeweils 6mT darstellen.

Die entsprechenden Magnetfelder RMF 34 und WMF 47 werden jeweils 30s nach Beginn der Erstarrung am Behälterboden zugeschaltet. Im Zeitraum bis zum Einsetzen der elektromagnetisch angetriebenen Strömung wächst ein grobes kolumnares Gefüge parallel zur Symmetrieachse des Behälters. Im Fall des wandernden Magnetfeldes WMF 47 in Fig. 5a ist ein sehr grobes Gefüge zu erkennen. Nach dem Einschalten des wandernden Magnetfelds WMF 47 wachsen die kolumnaren Körner zunächst nahezu unverändert weiter, bis etwa in der Mitte des Probekörpers der Übergang vom kolumnaren zum equiaxialen Wachstum eintritt. Beim kontinuierlich wirkenden rotierenden Magnetfeldes RWF 34 in Fig. 5b bildet sich zunächst ein modifiziertes kolumnares Gefüge heraus, d.h. die kolumnaren Körner werden feiner und wachsen zur Seite geneigt. In der Mitte des Probekörpers ist ein Morphologieübergang vom kolumnaren zum equiaxialen Kornwachstum zu beobachten. An der Erstarrungsfront transportiert die Sekundärströmung Si-reiche Schmelze zur Symmetrieachse hin. Dies führt zu typischen Entmischungsmustern, die eine Verarmung eutektischer Phase in den Randzonen und eine Konzentration im Bereich der Symmetrieachse aufweisen. Werden das rotierende Magnetfeld RMF 34 und das wandernde Magnetfeld WMF 47, wie in Fig. 5c gezeigt ist, diskontinuierlich nacheinander angewendet, ist sofort mit Aktivierung des elektromagnetischen Rührens ein Übergang vom grobkörnigen kolumnaren zum feinkörnigen equiaxialen Wachstum zu beobachten. Entmischungen sind nicht nachweisbar.

Folgende Vorteile werden durch die Erfindung erreicht:

- Bei der gerichteten Erstarrung dominieren keine Strömungen an der Erstarrungsfront, die im zeitlichen Mittel einen Stofftransport in bevorzugte Richtungen verursachen.
- Damit bilden sich keine unerwünschten Entmischungszonen heraus, die die mechanischen Eigenschaften verschlechtern.
- Eine sehr gute Durchmischung der Metall- oder Halbleiterschmelze ohne Entmischungen ist nachweisbar.
- Ein sparsamer Energieeinsatz für den Rühr- und Mischprozess wird erreicht.

- Es ergeben sich realisierbare Ergebnisse bei den erfindungsgemäß festgelegten Periodendauern für das in horizontaler Ebene rotierende Magnetfeld RMF 34 und das vertikal wandernde Magnetfeld WMF 47.

5 Bezugszeichenliste

- 1 Einrichtung
- 2 Flüssigkeit
- 3 Anordnung von Paaren Induktionsspulen
- 31 erstes Paar
- 10 32 zweites Paar
- 33 drittes Paar
- 34 rotierendes Magnetfeld RMF
- 4 Anordnung von coaxial übereinandergereihten Induktionsspulen
- 41 erste Induktionsspule
- 15 42 zweite Induktionsspule
- 43 dritte Induktionsspule
- 44 vierte Induktionsspule
- 45 fünfte Induktionsspule
- 46 sechste Induktionsspule
- 20 47 wanderndes Magnetfeld WMF
- 5 Metallblock
- 6 Kühlkanäle
- 7 Thermischer Isolationsmantel
- 8 Temperatursensor
- 25 9 Stromversorgungseinheit
- 10 Steuer-/Regeleinheit
- 11 Kühleinrichtung
- 12 Bodenplatte
- 13 Seitenwände
- 30 14 Behälter
- 15 Symmetrieachse

Patentansprüche

1. Verfahren zum elektromagnetischen Rühren elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten (2) unter Verwendung eines in der horizontalen Ebene rotierenden
 5 Magnetfeldes RMF (34) und eines dazu in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF (47),
 dadurch gekennzeichnet,
 dass sowohl das rotierende Magnetfeld RMF (34) als auch das wandernde Magnetfeld WMF (47) diskontinuierlich in Form von zeitlich begrenzten und
 10 einstellbaren Periodendauern ($T_{P,RMF}$, $T_{P,WMF}$) und abwechselnd zeitlich nacheinander über zugehörige Induktionsspulen (31,32,33;41,42,43,44, 45,46) zugeschaltet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
 15 dadurch gekennzeichnet,
 dass die Dauer ($T_{P,RMF}$) der Perioden von rotierendem Magnetfeld RMF (34) und die Dauer ($T_{P,WMF}$) der Perioden von wanderndem Magnetfeld WMF (47) in einem Zeitintervall

$$0.2 \cdot t_{i,a} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i,a} \quad (I)$$

20 liegen, mit folgender Definition für eine Einstellzeit $t_{i,a}$.

$$t_{i,a} = C_g \cdot \left(B_0 \sqrt{\frac{\sigma \omega}{\rho}} \right)^{-1} \quad (III)$$

wobei die Variablen σ , ρ , ω und B_0 die elektrische Leitfähigkeit und die Dichte der Flüssigkeit, die Frequenz und die Amplitude des Magnetfeldes RMF (34) oder WMF (47) und die Konstante C_g den Einfluss von Größe
 25 und Form des Volumens der Flüssigkeit (2) darstellen und wobei die Einstellzeit ($t_{i,a}$) den Zeitpunkt darstellt, an dem die volumengemittelte kinetische Energie der meridionalen Strömung oder die volumengemittelte meridionale Geschwindigkeit U_{rz} ein erstes Maximum erreicht.

30 3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2,
 dadurch gekennzeichnet,

dass verschiedene Periodendauern $T_{P,RMF}$, $T_{P,WMF}$ für das rotierende Magnetfeld RMF (34) und das wandernde Magnetfeld WMF (47) gemäß folgender Bedingung

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II)$$

5 eingestellt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

10 dass die Amplitude (B_0^{RMF}) des rotierenden Magnetfeldes RMF (34) die folgenden beiden Werte

$$B_1^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{100 \cdot V_{sol}}{H_0} \quad (VI) \quad \text{und}$$

$$B_2^{RMF} = \sqrt{\frac{\rho}{\sigma \omega}} \cdot \frac{40 \cdot V_{sol}^{3/2}}{\sqrt{H_0 \nu}} \quad (VII)$$

15 übersteigen, wobei die Parameter ν , V_{sol} und H_0 die kinematische Viskosität der Schmelze, die Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. die Höhe des Schmelzenvolumens darstellen und B_1^{RMF} und B_2^{RMF} die unteren Grenzwerte der Amplituden der rotierenden Magnetfeldes RMF (34) sind.

5. Verfahren nach Anspruch 1 und 3,

20 dadurch gekennzeichnet,

dass die Amplitude (B_0^{WMF}) des wandernden Magnetfeldes WMF (47) genauso groß oder bis zu viermal größer als die Amplitude (B_0^{RMF}) des rotierenden Magnetfeldes RMF (34) eingestellt wird, d.h.

$$B_0^{WMF} = 1 \dots 4 \cdot B_0^{RMF} \quad (VIII).$$

25

6. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

30 dass bei der Modulierung des Verlaufs der Lorentzkraft (F_L) anstelle der Rechteckfunktion andere Pulsformen, wie beispielsweise Sinus, Dreieck oder Sägezahn, realisiert werden, wobei der Verlauf und der Maximalwert

des jeweiligen Magnetfeldes RMF (34) oder WMF (47) so festgelegt werden, dass sich für die verschiedenen Pulsformen ein identischer Energieeintrag ergibt.

- 5 7. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Amplituden (B_0^{RMF} , B_0^{WMF}) der Magnetfelder RMF (34) und WMF
(47) während des Rührens kontinuierlich entsprechend den sich aus dem
zu betrachtenden Prozess ableitenden Anforderungen angepasst einge-
10 stellt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die einzelnen Periodendauern ($T_{\text{P,RMF}}$, $T_{\text{P,WMF}}$), in denen eines der
15 Magnetfelder RMF (34) oder WMF (47) zugeschaltet ist, durch eine Pausendauer T_{Pause} , in denen keines der beiden Magnetfelder RMF (34) oder WMF (47) auf die Flüssigkeit (2) einwirkt, unterbrochen werden, wobei $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,RMF}}$ oder $T_{\text{Pause}} \leq 0.5 \cdot T_{\text{P,WMF}}$ sind.
- 20 9. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Richtung des rotierenden Magnetfeldes RMF (34) und/oder des wandernden Magnetfeldes WMF (47) zwischen zwei Pulsen invertiert wird.
- 25 10. Einrichtung (1) zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten (2) unter Verwendung eines in der horizontalen Ebene rotierenden Magnetfeldes RMF (34) und eines in vertikaler Richtung wandernden Magnetfeldes WMF (47), zumindest enthaltend
- 30 - einen zylindrischen Behälter (14),
- eine den Behälter (14) umgebende zentralsymmetrische Anordnung (3) von mindestens drei Paaren (31,32,33) von Induktionsspulen zur Ausbildung eines eine Lorentzkraft F_L erzeugenden, rotierenden Magnetfeldes, RMF (34) und

- eine den Behälter (14) umgebende Anordnung (4) von mindestens zwei koaxial zur Symmetrieachse (15) stapelartig übereinandergereihten Induktionsspulen (41,42,43,44,45,46) zur Erzeugung des vertikal wandernden Magnetfeldes WMF (47) sowie
 - 5 - mindestens einen Temperatursensor (10) zur Temperaturmessung der Flüssigkeit (2) im Behälter (13) und Temperaturkontrolle seitens einer Steuer-/Regeleinheit (10),
dadurch gekennzeichnet,
dass eine Stromversorgungseinheit (10 zu den Induktionsspulen (31,32,33; 41,42,43,44,45,46) mit der Steuer-/Regeleinheit (10) verbunden ist, wobei
10 die Stromzufuhr zu den Induktionsspulen (31,32,33;41,42,43,44,45,46) mit den vorgegebenen Bedingungen

$$0.2 \cdot t_{i.a.} < T_{P,RMF} = T_{P,WMF} < 2 \cdot t_{i.a.} \quad (I) \text{ oder}$$

$$0.5 \cdot T_{P,RMF} < T_{P,WMF} < 5 \cdot T_{P,RMF} \quad (II)$$
 - 15 eingestellt erfolgt.
11. Einrichtung nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Behälter (14) mit der Schmelze (2) konzentrisch innerhalb der
20 Induktionsspulen (31,32,33;41,42,43,44,45,46) angeordnet ist.
12. Einrichtung nach Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Behälter (14) mit einer Heizeinrichtung und/oder Kühleinrichtung
25 (11) versehen ist.
13. Einrichtung nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Bodenplatte (12) in direktem Kontakt mit einem festen Metallkörper (5) steht, welcher im Innern von einem Kühlmedium durchflossen wird.
30
14. Einrichtung nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,

dass die Seitenwände (13) des Behälters (14) thermisch isoliert sind.

15. Einrichtung nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,
5 dass der Kühlkörper (5) mit einem Thermostaten in Verbindung steht.
16. Einrichtung nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,
10 dass sich zwischen dem Kühlkörper (5) und dem Behälter (14) ein Flüssigmetallfilm befindet, um einen stabilen Wärmeübergang bei geringem Übergangswiderstand zu erzielen.
17. Einrichtung nach Anspruch 16,
dadurch gekennzeichnet,
15 dass der Flüssigmetallfilm aus einer Galliumlegierung besteht.
18. Einrichtung nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,
20 dass in der Bodenplatte (12) und/oder den Seitenwänden (13) des Behälters (14), in dem sich die Schmelze (2) befindet, mindestens ein Temperatursensor (8) in Form eines Thermoelements positioniert ist, welches eine Information über den Zeitpunkt des Beginns der Erstarrung liefert und mit der Steuer-/Regeleinheit (10) zur Temperaturkontrolle der Flüssigkeit (2) verbunden ist.
- 25
19. Verwendung der Einrichtung (1) zum elektromagnetischen Rühren von elektrisch leitenden Flüssigkeiten (2) nach den Ansprüchen 10 bis 18 in Form von metallischen Schmelzen in metallurgischen Prozessen oder in Form von Halbleiterschmelzen in der Kristallzüchtung, zur Reinigung von
30 Metallschmelzen, beim Stranggießen oder bei der Erstarrung metallischer Werkstoffe mittels des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 9.

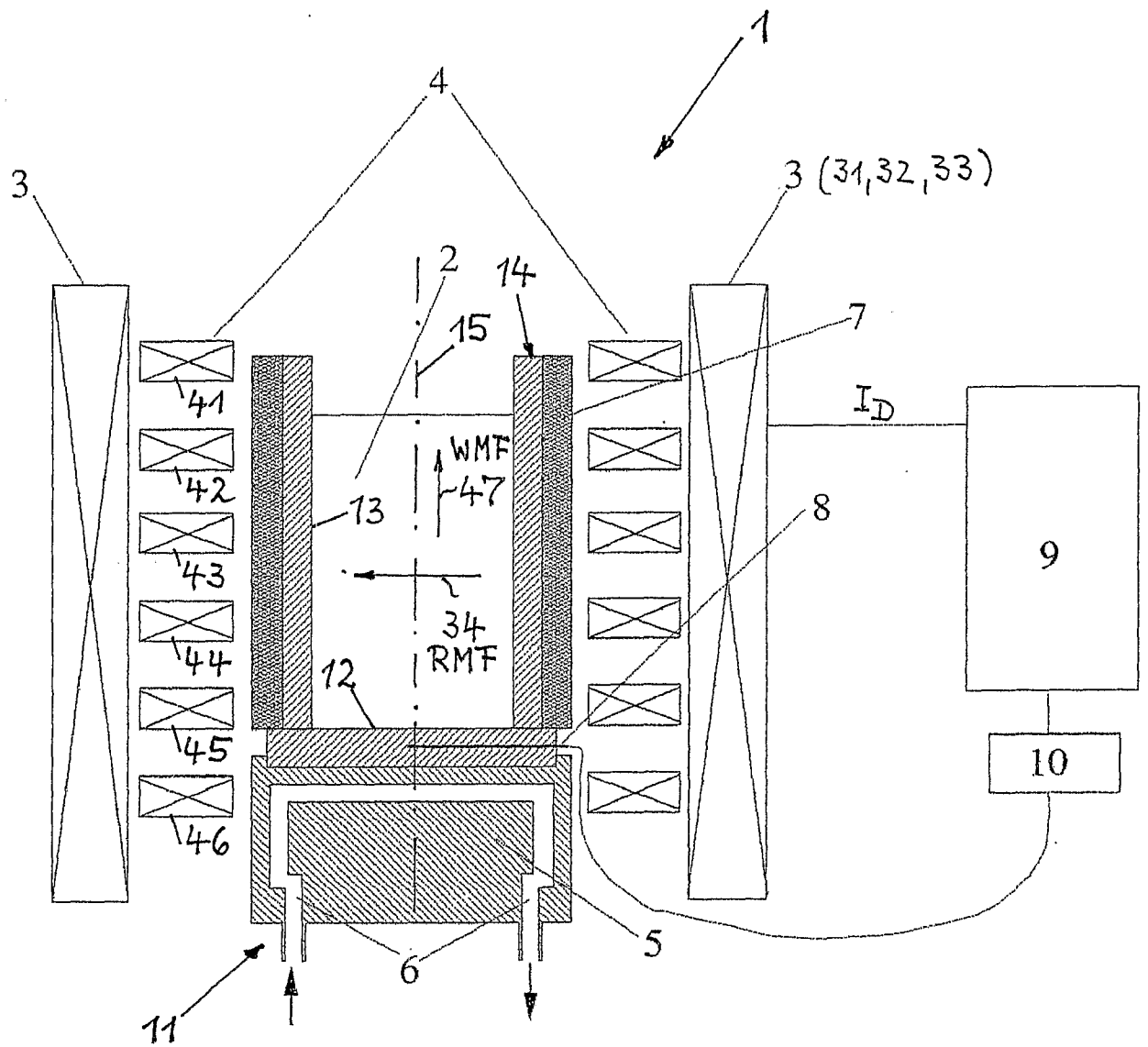


Fig. 1

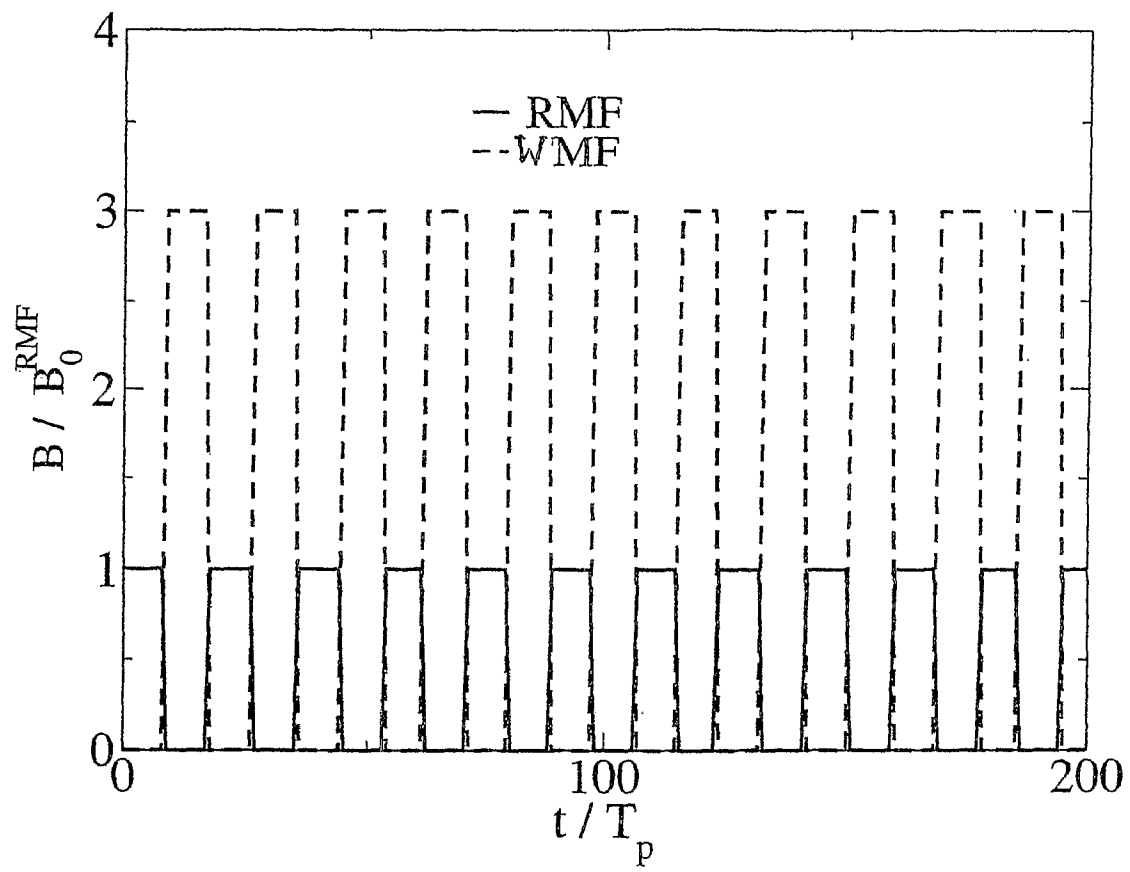


Fig. 2

Fig. 3

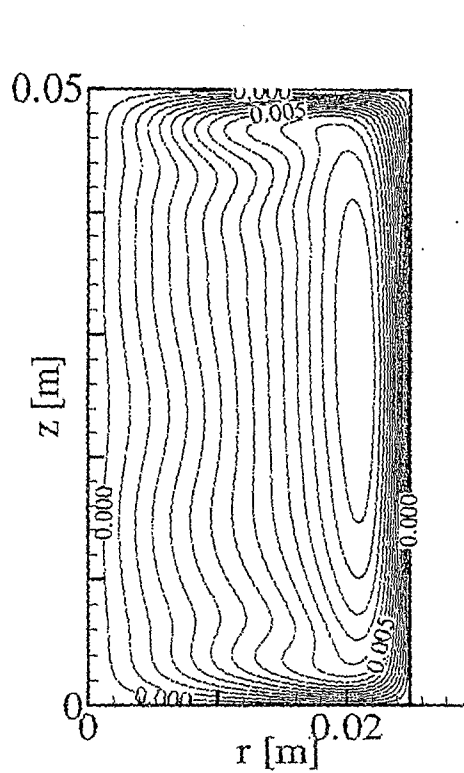


Fig. 3a1

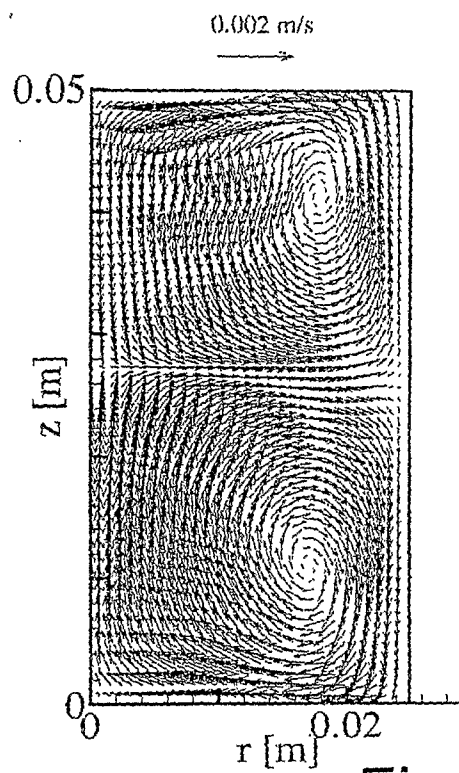


Fig. 3a2

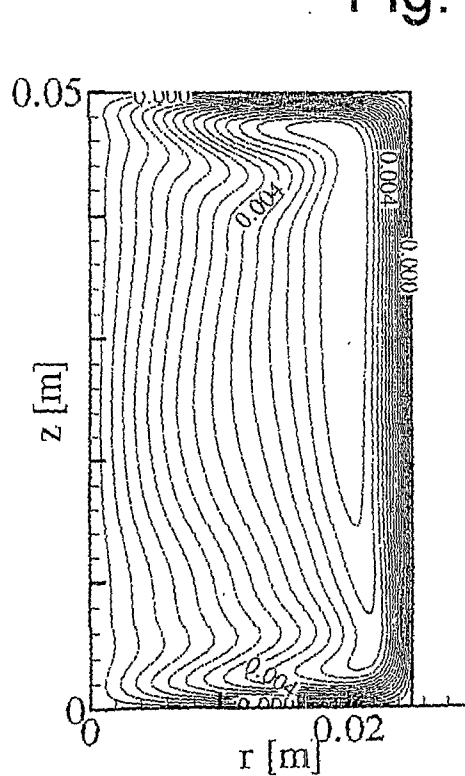


Fig. 3b1

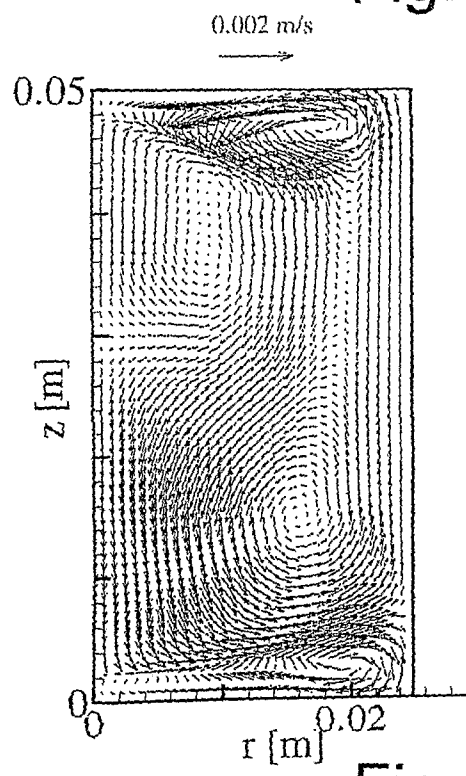


Fig. 3b2

Fig. 4

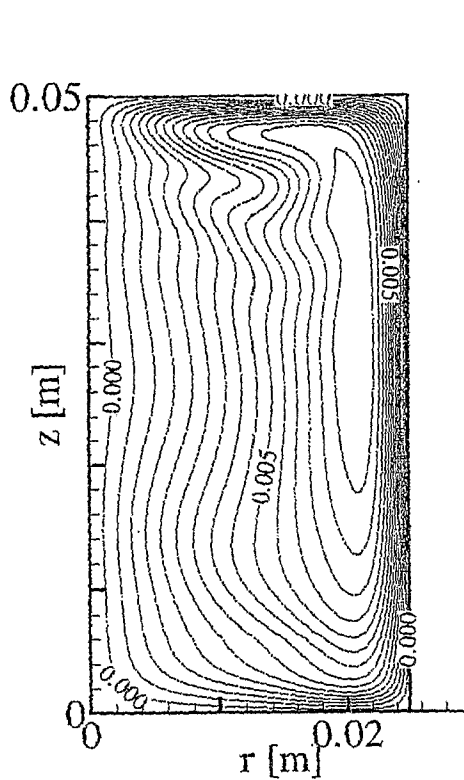


Fig. 4a1

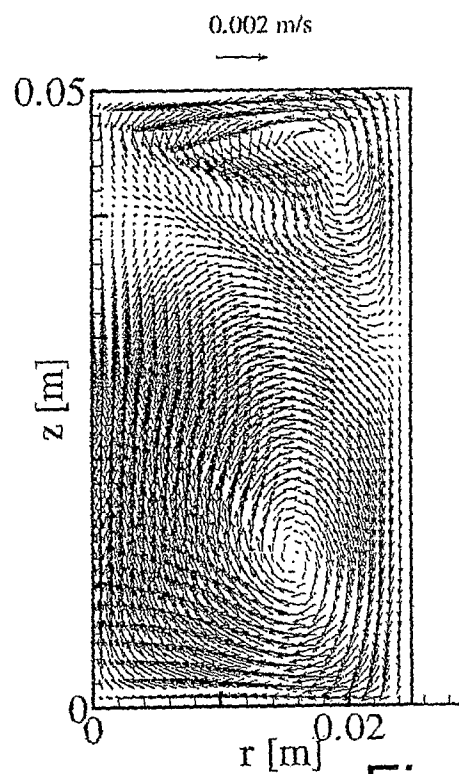


Fig. 4a2

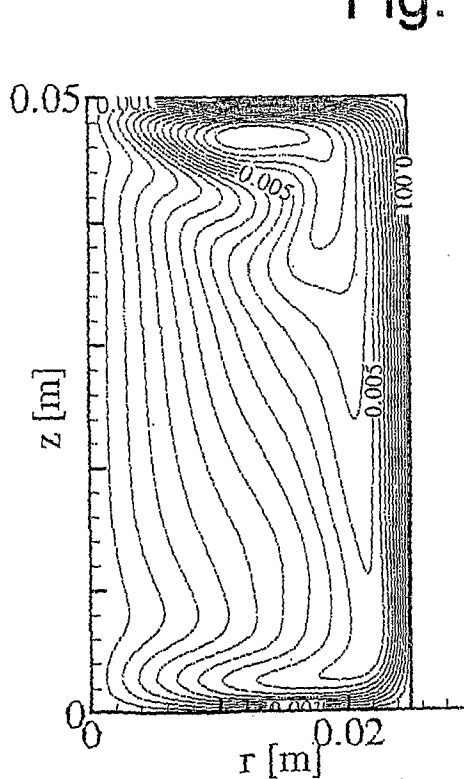


Fig. 4b1

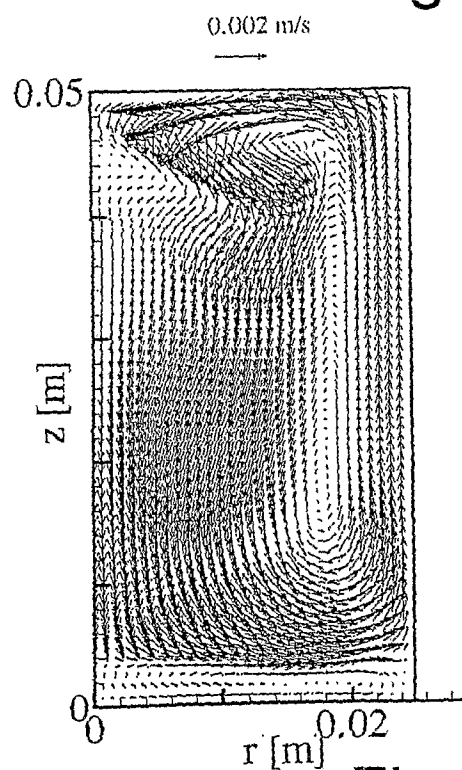
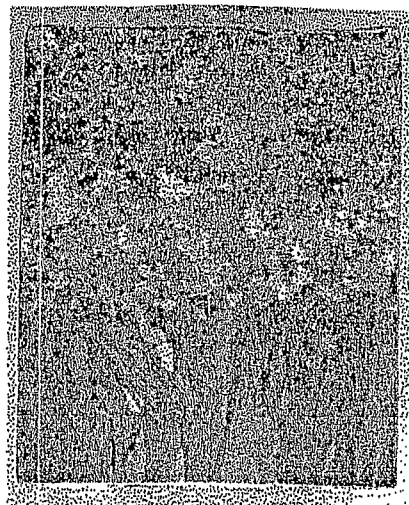


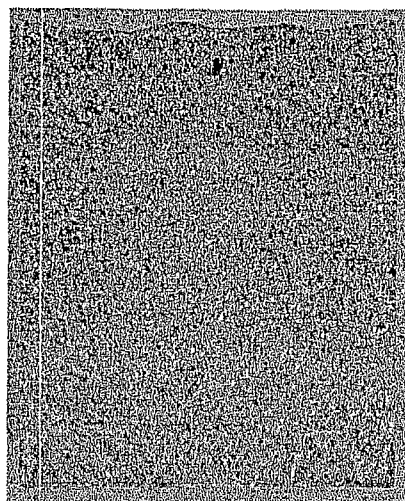
Fig. 4b2

Fig. 5



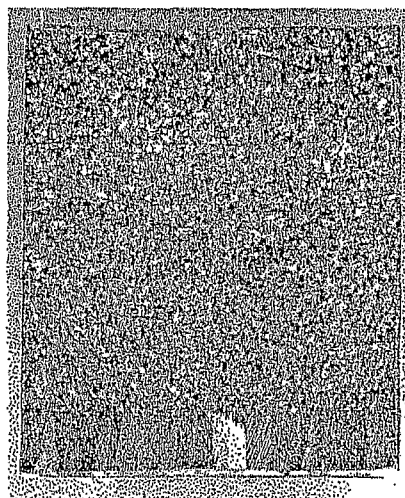
WMF, 6 mT

Fig. 5a



RMF 6.68 mT

Fig. 5b



RMF+WMF, jeweils 6 mT

Fig. 5c

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/DE2008/001261

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. B22D11/115 B22D27/02 B01F13/08

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 B01F B22D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched.

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2003 220323 A (UNIV TOHOKU) 5 August 2003 (2003-08-05) cited in the application abstract; figures 1-4 -----	1
A	WO 01/91949 A (AEMP CORP [US]; LU JIAN [US]; WANG SHAUPOH [US]; NORVILLE SAMUEL M D []) 6 December 2001 (2001-12-06) the whole document -----	1
A	US 2006/038328 A1 (LU JIAN [US] ET AL) 23 February 2006 (2006-02-23) the whole document -----	1
A	DE 10 2004 017443 B3 (UNIV DRESDEN TECH [DE]) 21 April 2005 (2005-04-21) figures 1,2 -----	10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *G* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

6 Januar 2009

Date of mailing of the international search report

13/01/2009

Name and mailing address of the ISA/
 European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Scheid, Michael

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/DE2008/001261

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP 2003220323	A	05-08-2003	JP 4134310 B2	20-08-2008
WO 0191949	A	06-12-2001	AT 299412 T	15-07-2005
			AT 367230 T	15-08-2007
			AU 6471101 A	11-12-2001
			AU 2001264711 B2	27-04-2006
			CA 2410806 A1	06-12-2001
			DE 60035626 T2	21-05-2008
			DE 60111943 D1	18-08-2005
			DE 60111943 T2	20-04-2006
			EP 1294510 A1	26-03-2003
			ES 2248336 T3	16-03-2006
			HK 1054524 A1	24-02-2006
			JP 2003534920 T	25-11-2003
			US 2002186616 A1	12-12-2002
			US 6402367 B1	11-06-2002
US 2006038328	A1	23-02-2006	NONE	
DE 102004017443	B3	21-04-2005	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2008/001261

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. B22D11/115 B22D27/02 B01F13/08

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
B01F B22D

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	JP 2003 220323 A (UNIV TOHOKU) 5. August 2003 (2003-08-05) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung; Abbildungen 1-4	1
A	WO 01/91949 A (AEMP CORP [US]; LU JIAN [US]; WANG SHAUPOH [US]; NORVILLE SAMUEL M D []) 6. Dezember 2001 (2001-12-06) das ganze Dokument	1
A	US 2006/038328 A1 (LU JIAN [US] ET AL) 23. Februar 2006 (2006-02-23) das ganze Dokument	1
A	DE 10 2004 017443 B3 (UNIV DRESDEN TECH [DE]) 21. April 2005 (2005-04-21) Abbildungen 1,2	10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen
- *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- *L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- *T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- *X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- *Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- *G* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 6. Januar 2009	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts 13/01/2009
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Scheid, Michael

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2008/001261

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
JP 2003220323	A	05-08-2003	JP	4134310 B2	20-08-2008
WO 0191949	A	06-12-2001	AT	299412 T	15-07-2005
			AT	367230 T	15-08-2007
			AU	6471101 A	11-12-2001
			AU	2001264711 B2	27-04-2006
			CA	2410806 A1	06-12-2001
			DE	60035626 T2	21-05-2008
			DE	60111943 D1	18-08-2005
			DE	60111943 T2	20-04-2006
			EP	1294510 A1	26-03-2003
			ES	2248336 T3	16-03-2006
			HK	1054524 A1	24-02-2006
			JP	2003534920 T	25-11-2003
			US	2002186616 A1	12-12-2002
			US	6402367 B1	11-06-2002
US 2006038328	A1	23-02-2006	KEINE		
DE 102004017443	B3	21-04-2005	KEINE		