

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 391 067 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
11.09.1996 Patentblatt 1996/37

(51) Int Cl.⁶: **F27B 14/06**, F27B 14/10,
H05B 6/24

(21) Anmeldenummer: **90103959.4**

(22) Anmeldetag: **01.03.1990**

(54) **Einrichtung mit einem Tiegel aus Metall**

Device with a metallic crucible

Installation comportant un creuset métallique

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI SE

(30) Priorität: **04.04.1989 DE 3910777**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
10.10.1990 Patentblatt 1990/41

(73) Patentinhaber: **LEYBOLD
AKTIENGESELLSCHAFT
D-63450 Hanau (DE)**

(72) Erfinder: **Stenzel, Otto W., Dr.
D-6466 Gründau 4 (DE)**

(74) Vertreter: **Schickedanz, Willi, Dipl.-Ing.
Langener Strasse 68
D-63073 Offenbach (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A- 0 074 871 DE-A- 3 703 108
DE-B- 1 055 715 DE-B- 1 153 134
DE-B- 1 225 787 DE-C- 518 499
SU-A- 735 893 US-A- 1 839 802
US-A- 3 775 091 US-A- 4 738 713**

EP 0 391 067 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Induktionsofen mit einem metallischen Tiegel für die Aufnahme von metallischem Material nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

5 Beim Schmelzen von Stoffen in Tiegeln ist darauf zu achten, daß der Tiegel eine höhere Schmelztemperatur hat als der zu schmelzende Stoff, denn bei herkömmlichen Tiegeln wird die Innenfläche des Tiegels genauso warm wie die Schmelze. In den meisten Fällen genügen Tiegel aus Keramik den Anforderungen, da sie eine sehr hohe Schmelztemperatur besitzen. Allerdings kann die stark erhitzte Innenfläche eines Keramik-Tiegels chemisch mit der Schmelze reagieren, wodurch die Schmelze durch das Tiegelmateriale verunreinigt wird. Die Verunreinigung besteht in der Regel 10 darin, daß die Schmelze unter Reduktion der Tiegeloxydkeramik oxidiert wird. Es ist jedoch auch möglich, daß Verunreinigungen des Tiegels, z. B. Schwefel in Lösung gehen. Außerdem können Keramikpartikel vom Tiegel abplatzen und in das Schmelzgut gelangen, wo sie nach der Erstarrung des Schmelzguts Einschlüsse bilden, die oft als "low density inclusions" bezeichnet werden. Solche Einschlüsse mindern die Qualität der erstarrten Schmelze, da sie z. B. Ausgangspunkt von Rissen sind.

15 Es ist bereits ein Verfahren zum induktiven Schmelzen reaktiver Metalle und Legierungen in nicht-reaktiver Umgebung bekannt, bei dem das Schmelzgut in einem in Segmente unterteilten Tiegel in Anwesenheit von isolierender Schlacke geschmolzen wird (US-A-4 738 713 = EP-A-0 276 544). Mit diesem bekannten Verfahren ist es indessen nicht möglich, die von der den Tiegel umgebenden Induktionsspule abgegebene induktive Leistungsdichte ortsabhängig zu verändern.

20 Weiterhin ist ein Verfahren zum Schmelzen schwerschmelzbarer Metalle, insbesondere von Tantal, Wolfram, Thorium oder Legierungen dieser Metalle in einem wassergekühlten Behälter bekannt (DE-C-518 499). Bei diesem Verfahren wird auch ein Tiegel eingesetzt, der aus einer Reihe gegeneinander isolierter, mit Kühlkanälen durchsetzter Metallsegmente besteht. Das hierbei verwendete Isoliermittel kann jedoch zu einer Kontaminierung der Schmelze führen.

25 Bei einem anderen bekannten Verfahren zum physikalischen Trennen einer metallischen Phase in einem Induktionsofen wird eine zweigeteilte Induktionsspule verwendet (EP-A-0 076 871). Der eine Teil wird beispielsweise bei einer Leistung von 40 kW mit einer Wechselspannung von 850 kHz beaufschlagt, während der andere Teil bei einer Leistung von 15 kW und einer Spannung von 10 kHz beaufschlagt wird. Bei dem verwendeten Tiegel handelt es sich um einen kalten, aber nicht um einen geschlitzten Tiegel.

30 Ferner ist ein kalter Induktionstiegel bekannt, der eine sich selbst erzeugende und sich selbst erneuernde Isolierung aufweist (US-A-3 775 091). Dieser Induktionstiegel besitzt mehrere vertikale Segmente, die von einer Spule umgeben sind. Diese Spule erzeugt jedoch kein Magnetfeld, dessen Leistungsdichte vom hydrostatischen Druck der Schmelze abhängt. Außerdem berührt die Schlacke der Schmelze die Innenseite des Tiegels.

35 Weiterhin ist ein Induktionstiegel bekannt, der von einer Induktionsspule umgeben ist, deren Windungszahl sich in Abhängigkeit von der Höhe des Tiegels verändert (US-A-1 839 802). Bei diesem Tiegel handelt es sich jedoch um keinen geschlitzten Tiegel.

Schließlich ist auch noch ein kalter Tiegel bekannt, der mit einer Induktionsspule umgeben ist und dessen Seitenwände geschlitzt sind (SU-PS 735 893). Um zu vermeiden, daß die Schmelze durch das Metall der Tiegel-Segmente verunreinigt wird, wenn während des Betriebs zwischen den Segmenten Entladungen stattfinden, sind die Seitenoberflächen benachbarter Segmente in einem Winkel von 30 - 90 Grad zueinander geneigt. Da die verwendete Induktionsspule nur aus einer einzigen Windung besteht, ist es nicht möglich, mit dieser einen Spule ein magnetisches Feld aufzubauen, dessen Leistungsdichte von der Höhe des Tiegels abhängig ist.

40 Ein prinzipieller Nachteil der oben beschriebenen Schmelzverfahren mit gekühltem Tiegel besteht in den hohen Energieverlusten, die das Schmelzgut durch Abgabe von Wärme an die Tiegelwand erleidet. Der thermische Prozeßwirkungsgrad kann nur dadurch in akzeptabler Größe gehalten werden, daß der Einschmelz-Prozeß möglichst schnell abläuft und damit die als Wärmeverluste abgeführte Energiemenge - als Produkt von Verlustleistung und Zeit - klein wird.

45 Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 zu schaffen, mit der es möglich ist, durch Schmelzen hochreines Metall zu erzeugen und die Wärmeverluste zu reduzieren.

50 Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß die elektrische Energie effizient zum Schmelzgut gebracht werden kann, ohne daß dieses mit elektrisch isolierenden Teilen kontaminiert wird, denn die Schlitz zwischen den Segmenten des Tiegels sind nur im von der Schmelze abgewandten Bereich mit einem Isolator 55 aufgefüllt. Der der Schmelze zugewandte Bereich ist auf der Tiefe etwa einer Schlitzbreite leer. Außerdem kann der Schmelzvorgang gleichmäßig und schnell durchgeführt werden, weil der Strahlungsdruck der induktiven Energieversorgung dem Gravitationsdruck der Schmelze entgegenwirkt. Durch die höhenabhängige Leistungsdichte wird bei einer gewählten Betriebsfrequenz die maximal mögliche Heizleistung erzielt. Gleichzeitig werden die Wärmeverluste

aus der Schmelze zum Tiegel reduziert, da die mechanische Anlagefläche zwischen der Schmelze und dem Tiegel so gering wie möglich gehalten wird. Dies ergibt sich im zylindrischen Teil der Schmelze durch die partiell zurückgedrängte Schmelzenaußenfläche, bedingt durch den höhenabhängig optimierten elektromagnetischen Strahlungsdruck. Hierdurch wird der Querschnitt des Tiegels auf allen Schmelzbadhöhen voll ausgenutzt. Wird die Badkuppe durch zusätzliche Maßnahmen stabilisiert, so wird in diesem Bereich die wärmeabstrahlende Oberfläche so gering wie möglich gehalten. Die Vorteile der Erfindung treten indessen nicht nur beim Schmelzvorgang zutage, sondern auch beim sogenannten Temperaturhalten, also während der Zeit, in der das Schmelzgut bereits geschmolzen ist und für einen vorgegebenen Zeitraum im geschmolzenen Zustand gehalten werden soll. Während der Temperatur-Haltezeit wird die Frequenz des aufheizenden Induktionsstroms so weit abgesenkt, daß sich bei reduzierter Leistung ähnlich hohe Kräfte ergeben wie beim Schmelzen. Um lokale Überhitzungen vor allem bei großen Tiegeln zu vermeiden, können bei einer besonderen Ausführungsform der Erfindung unterschiedliche Frequenzen in verschiedenen Heizzonen bzw. Teilspulen verwendet werden. Die höhenabhängige Leistungsverteilung bietet während des Temperaturhaltens auch noch den Vorteil, daß durch die sich ausbildende relativ große Oberfläche die Schmelze schnell entgasen kann, so daß die Behandlungszeit und die Verluste kleiner werden. Hinzu kommt, daß sich im Schmelzbereich mit nach unten ansteigender Leistungsdichte ein großer zusammenhängender Wirbel ausbildet, der die Schmelze thermisch und metallurgisch gut durchmischt. Außer beim Schmelzen und beim Temperaturhalten weist die Erfindung auch noch beim Erstarren der Schmelze Vorteile auf. Das induktive Schmelzen von Materialien in einem gekühlten Tiegel hat bekanntlich gegenüber dem herkömmlichen Induktionsschmelzen den generellen Vorteil, daß die Schmelze nicht in eine Kokille ausgegossen werden muß. Vielmehr ist es möglich, die Schmelze im Tiegel erstarren zu lassen, wodurch die Investitionskosten reduziert werden. Durch einfaches Ausschalten des Induktionsstroms wird hierbei eine ähnliche Blockqualität wie beim Kokillenguß erzielt. Durch die erfindungsgemäße Maßnahme, daß die unteren Heizzonen im Vergleich zu den oberen Heizzonen, von der Halteleistung ausgehend, stark heruntergeregelt werden, schreitet die Erstarrungszone von unten nach oben langsam fort, und es ergibt sich eine gerichtete Erstarrungsstruktur. Für andere Legierungstypen ist es vorteilhaft, ein feinkörniges Primärgefüge zu erzeugen. Die im Liquidus-Bereich aufrechterhaltene Rührwirkung des elektromagnetischen Feldes bewirkt hierbei, daß Feinkorn im Block erzeugt wird.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

- Fig. 1a eine Prinzipdarstellung eines herkömmlichen und an sich bekannten Induktionsschmelzofens;
- Fig. 1b die an sich bekannte Abhängigkeit der Eindringtiefe in einen metallischen Block;
- Fig. 2a einen wassergekühlten und in Segmente aufgeteilten Induktionsschmelzofen, dessen Schmelzgut induktiv aufgelöst wird;
- Fig. 2b eine Draufsicht auf den Schmelztiegel gemäß Fig. 2a;
- Fig. 3 eine erste Variante eines erfindungsgemäßen Induktionsschmelzofens;
- Fig. 4 eine zweite Variante eines erfindungsgemäßen Induktionsschmelzofens;
- Fig. 5 eine dritte Variante eines erfindungsgemäßen Induktionsschmelzofens;
- Fig. 6 und 7 Leistungsdichteverteilungen über die z-Achse.

In der Fig. 1a ist das Prinzip eines Induktionsschmelzofens 1 dargestellt, der einen Induktor 2 und Schmelzgut 3 aufweist. Der Induktor 2 besteht aus einer Spule, die eine Induktivität und einen ohmschen Widerstand aufweist. Durch den Induktor 2 fließt ein Strom, der im Schmelzgut 3, das aus leitfähigem Material besteht, eine Spannung induziert, die ihrerseits einen Stromfluß im Schmelzgut 3 bewirkt, der eine Erwärmung des Schmelzguts zur Folge hat. Mit δ ist die Eindringtiefe des Stroms bezeichnet.

Die Fig. 1b zeigt den Verlauf der Stromdichte g in Abhängigkeit von der Entfernung zum Mittelpunkt $x = 0$ für zwei verschiedene Frequenzen $f_2 > f_1$. Mit δ_1 ist die Eindringtiefe für die Frequenz f_1 bezeichnet; es handelt sich dabei um diejenige Stelle bei einer ebenen, sehr dicken Wand, an der die Stromdichte g von 1 auf $1/e$ abgenommen hat, wobei e die Eulersche Zahl ist. Man erkennt hieraus, daß der Strom um so weniger tief eindringt, je höher seine Frequenz ist.

Die Ströme, die im Schmelzgut 3 fließen, werden auch Wirbelströme genannt. Wirbelströme entstehen immer dann, wenn sich in einem magnetischen Wechselfeld elektrisch leitende Stoffe befinden. Sie fließen auf Bahnen, die mit den magnetischen Induktionslinien verkettet sind. Das Entstehen und die Eigenschaften von Wirbelströmen sind bekannt (vgl. K. Kupfmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, 11. Auflage, 1984, S. 304 ff.) und sollen deshalb nicht näher beschrieben werden.

Eine wichtige Rolle spielt bei Induktionsschmelzöfen auch die spezifische Wärmeleistung, d. h. die in der Volumeneinheit des Schmelzguts 3 in Wärme umgewandelte Leistung. Die Verteilung dieser Wärmeleistung ist ebenfalls bekannt (K. Simonyi, Theoretische Elektrotechnik, 1956, S.304), so daß auf ihre Herleitung verzichtet werden kann.

In der Fig. 2a ist ein erfindungsgemäßer Induktionsschmelzofen 1 dargestellt, der einen Tiegel 4 aufweist, welcher in verschiedene Segmente 5, 6, 7 unterteilt ist. Um den Tiegel 4 herum ist ein Induktor 2, d. h. eine Spule, angeordnet, die auf das Schmelzgut 3 einwirkt. In den einzelnen Segmenten 5, 6, 7 des Tiegels 4 verlaufen Kühlrohre 8, 9 mit

einem Wasserzufluß 10 und einem Wasserabfluß 11. Der Tiegel 4 besteht vorzugsweise aus einem relativ gut wärmeleitenden Metall, da Glas oder Keramik die Schmelze zu sehr verunreinigen würden. Da gut wärmeleitende Metalle auch gute elektrische Leiter sind, dringt die von der Spule 2 erzeugte magnetische Energie hauptsächlich durch die Schlitze 12, 13 zwischen den Segmenten 5, 6, 7 des Tiegels 4 zum Schmelzgut 3 vor. Dieses Schmelzgut ist im oberen Bereich 14 flüssig und stützt sich über eine erstarrte Schicht 15 auf einer gekühlten Platte 16 ab. Die Platte 16 kann mit einer Stange 17 nach oben oder nach unten bewegt werden.

Das flüssige Schmelzgut 3 kann bezüglich seiner mechanischen Eigenschaften als Flüssigkeit betrachtet werden. Sieht man von Strömungen des Schmelzguts 3 ab, d. h. nimmt man an, daß das Schmelzgut 3 ruht, so gilt, daß der Druck in einem Punkt des Schmelzguts nicht von der Orientierung des Flächenelements abhängt, auf das er wirkt: Der Druck in einer ruhenden Flüssigkeit ist in allen Richtungen gleich. Hieraus folgt, daß bei einer Flüssigkeitssäule in Punkten gleicher Höhe der gleiche Druck herrscht. Allerdings hängt der Druck von der Höhenkoordinate ab. Denkt man sich z_0 als festes Niveau und wählt man das Koordinatensystem so, daß $z_0 = 0$ wird, dann gilt für den Druck $p(z)$

$$p(z) = P_0 - \rho g z$$

wobei ρ die Dichte der Schmelze und g die Erdbeschleunigung bedeuten. Diese aus der Hydrostatik bekannte Formel besagt, daß in einer schweren, dichtebeständigen Flüssigkeit der Druck linear mit wachsender Höhe fällt bzw. linear mit der Tiefe ansteigt.

Die elektromagnetische Energie, die von der Spule 2 dem Schmelzgut 3 zugeführt wird, dringt hauptsächlich durch die Schlitze 12, 13 ein und erzeugt im Volumen der Schmelze einen Strahlungsdruck. Übersteigt der lokale Strahlungsdruck den auf die Wände des Tiegels ausgeübten Flüssigkeitsdruck, so wird das Schmelzgut an der Stelle, wo sich die Schlitze befinden, so weit nach innen gedrängt, daß durch Feldstärkenschwächung und/oder durch Vergrößerung der Flüssigkeitshöhe aus dem verdrängten Material sich ein Gleichgewichtszustand ergibt. Es ist folglich kein optimaler Schmelzvorgang möglich. Der Strahlungsdruck darf deshalb an der Wandinnenseite des Tiegels 4 nicht größer als der hydrostatische Druck der Schmelze 3 sein. Da dieser hydrostatische Druck von der z -Koordinaten abhängt, wird gemäß der Erfindung auch der Strahlungsdruck so ausgelegt, daß er ebenfalls von der z -Koordinaten abhängt. Dies geschieht z. B. in der Weise, daß das Quadrat der Amplitude des in das Schmelzgut 3 eindringenden Magnetfeldes linear von oben nach unten zunimmt.

Der zeitlich gemittelte Strahlungsdruck einer elektromagnetischen Welle, die senkrecht auf eine leitende Metallwand aufrifft, von der sie teilweise reflektiert wird, ist

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{\infty} \mathcal{K} \vec{E}(x_1, t) \times \mu \vec{H}(x_1, t) dx dt$$

worin \mathcal{K} die elektrische Leitfähigkeit, μ die magnetische Permeabilität und \vec{E} und \vec{H} die elektrischen bzw. magnetischen Feldstärken der Welle bedeuten (vgl. Bergmann/Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II, Elektrizität und Magnetismus, 7. Auflage, S. 501; Mathematische Ableitungen des Strahlungsdrucks über den Maxwell'schen Spannungstensor finden sich z. B. in W. Greiner, Theoretische Physik, Band 3, Klassische Elektrodynamik, 4. Auflage, 1986, S. 242 bis 247).

Wenn die Wand eine endliche Leitfähigkeit hat, was auf das Schmelzgut 3 zutrifft, wird die einfallende Welle nicht vollständig, sondern nur zum Teil reflektiert, so daß die elektrische Feldstärke an der Wand nicht vollständig verschwindet; daher trägt in diesem Fall auch die elektrische Feldstärke zum Druck bei, aber entsprechend ist die magnetische Feldstärke kleiner als vorher. Wenn die Welle zum Teil noch durch die Wand hindurchdringt, so tritt auch auf der Rückseite ein Druck auf, der von dem auf die Vorderseite wirkenden abzuziehen ist.

Die Leistungsdichte oder Strahlungsleistung pro Flächeneinheit wird bekanntlich als Poyntingvektor bezeichnet (vgl. Simonyi, a.a.O., S. 28 ff). Dieser Vektor ist definiert als das Vektorprodukt der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Feldstärke:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}.$$

Für die ebene Anordnung ergeben sich relativ einfache mathematische Ausdrücke. Bei dem erfindungsgemäß verwendeten Tiegel handelt es sich zwar um einen rotationssymmetrischen Körper, doch sind die Unterschiede gegenüber einer ebenen Anordnung in der Praxis nicht sehr groß, weshalb es genügt, die wesentlichen Gleichungen für ebene Verhältnisse aufzustellen und auf die schwerer überschaubaren Zylinderfunktionen zu verzichten. Unter Zugrundelegung einer ebenen Anordnung ergeben sich folgende Randbedingungen:

$$\underline{E}_x = 0, \text{ wobei } E_x \text{ die Komponente der elektrischen Feldstärke in x-Richtung}$$

EP 0 391 067 B1

$$\underline{E}_y = \underline{E}_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{x}{\delta}}$$

5 wobei E die Komponente der elektrischen Feldstärke in y -Richtung, δ die Eindringtiefe und E_0 die maximale Amplitude der elektrischen Feldstärke

$\underline{E}_z = 0$, wobei E die Komponente der elektrischen Feldstärke in z -Richtung

$\underline{H}_x = 0$, wobei H_x die Komponente der magnetischen Feldstärke in x -Richtung

$\underline{H}_y = 0$, wobei H_y die Komponente der magnetischen Feldstärke in y -Richtung

$$10 \quad H_z = \underline{E}_0 \frac{\kappa \cdot \delta}{1+j} e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{x}{\delta}},$$

wobei \underline{E}_0 die maximale Amplitude der elektrischen Feldstärke, κ die elektrische Leitfähigkeit und $j = \sqrt{-1}$

15 Nach den Regeln der komplexen Rechnung ergibt sich hieraus für den Betrag des Poyntingschen Vektors in x -Richtung

$$\underline{S}_x = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\underline{E}_y \cdot \underline{H}_z^*)$$

Hierin bedeutet H^* die zu H konjugierte Zahl. Der Zahlenfaktor $1/2$ rührt von der zeitlichen Mittelwertbildung bei sich sinusförmig ändernden Vorgängen her (Simonyi, a.a.O., S. 283, Gleichung 35).

20 Die über die Oberfläche anströmende Leistungsdichte ergibt sich nach einer Umrechnung zu:

$$S_0 = E_0^2 \cdot \frac{\kappa \cdot \delta}{4}$$

(vgl. Simonyi, a.a.O., S. 283, Gleichung 38).

25 Die in das Schmelzgut eindringende elektromagnetische Leistung erzeugt mechanische Kräfte in der Schmelze. Die Volumenkraftdichte \vec{f} wird für den Fall einer über das Volumen konstanten elektrischen Leitfähigkeit und Permeabilität beschrieben durch:

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} = \kappa \cdot \mu \cdot \vec{E} \times \vec{H}$$

30 wobei \vec{J} die Stromdichte und \vec{B} die magnetische Induktion sind.

Die Volumenkraftdichte ist direkt proportional zum Betrag des Poynting'schen Vektors. Die sich im Volumen der Schmelze ausbildende Größe "Druck" berechnet sich aus dem Integral über das Skalarprodukt der Volumenkraftdichte und dem Weg:

$$35 \quad p = \int_0^x \vec{f} \cdot \vec{ds}$$

Da für ein ebenes Feld nur eine Kraftdichtenkomponente normal, d. h. senkrecht zur Oberfläche auftritt, gilt:

$$40 \quad p = \int_0^x f_x \cdot dx$$

$$45 \quad = \frac{1}{2} \kappa \cdot \mu \operatorname{Re} \int_0^x E_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{x}{\delta}} \cdot E_0 \cdot \frac{\kappa \cdot \delta}{1-j} e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{x}{\delta}} dx$$

$$= \frac{1}{8} \mu \kappa^2 \cdot \delta^2 \cdot E_0^2 [1 - e^{-\frac{2x}{\delta}}]$$

50 Setzt man in diese Gleichung das Ergebnis für die Leistungsdichte an der Oberfläche ein, so ergibt sich

$$p = \frac{1}{2\pi f \delta} \cdot S_0 [1 - e^{-\frac{2x}{\delta}}]$$

55 Der elektromagnetische Strahlungsdruck tritt also nicht sprunghaft an der Oberfläche des Materials auf, sondern baut sich über den Weg normal zur Oberfläche auf. Da die Eindringtiefen bei den üblichen Heizfrequenzen klein sind, kann man für die Ausbildung der Schmelzbadoberfläche in erster Näherung annehmen, daß der elektromagnetische Druck auf die Oberfläche wirkt. Der elektromagnetische Strahlungsdruck ist somit proportional der der Schmelze zugestrahlten Leistungsdichte.

In der Fig. 2b ist eine Draufsicht auf den Schmelzofen 1 dargestellt, bei dem man die Segmente 5 bis 7 und 18 bis 22 sowie die Schlitz 12, 13 und 23 bis 28 zwischen den Segmenten 5 bis 7, 18 bis 22 erkennt.

Gemäß der Erfindung beginnt der Schmelzvorgang in der Mitte der einzelnen Segmente 5 bis 7 und 18 bis 22 und nicht hinter den Schlitz 12, 13 und 23 bis 28. Befindet sich das Schmelzgut 3 im flüssigen Zustand, so wird es nach innen gedrängt, und es bildet sich in der Schmelze eine radiale Zerfurchung aus, die an der Badoberfläche am ausgeprägtesten ist. Die aus der Schmelze hervorstehenden Stege stehen sternförmig nach außen und befinden sich gegenüber den Mitten der Segmente 5 bis 7 bzw. 18 bis 22. Ein Feldeinfall über den Tiegeloberrand von oben auf die Schmelzbadkuppe muß vermieden werden, da es sonst zu einer zeltartigen Verformung der Badkuppe kommt und die Faltenbildung unterstützt wird. Der Feldeinfall über den Tiegelrand kann z. B. dadurch verhindert werden, daß die Induktionsspule 2 nicht über den Tiegelrand hinausreicht.

Die Fig. 3 zeigt eine Variante der Erfindung, bei der ein anders angeordnetes Kühlsystem vorgesehen ist und die eine Spule mit nach unten abnehmender Steigung aufweist. Der Tiegel 4, der wieder mehrere Segmente 5, 6, 7 und z. B. ein Volumen von 5,5 dm³ aufweist, besitzt eine Kühlmittel-Einlaßöffnung 10 und eine Auslaßöffnung 11 für Kühlwasser. Als Kühlmittel kann auch flüssiges Metall, z. B. Na oder NaK oder eine organische Flüssigkeit, z. B. ein schwerentflammbares Öl verwendet werden. Desgleichen ist es möglich, als Kühlmittel flüssiges Salz zu verwenden, beispielsweise NaNO₂, NaNO₃ oder KNO₃. Die oberen Windungen 29, 30 der Spule 2 liegen weiter auseinander als die unteren Windungen 31, 32. Hierdurch tritt im unteren Bereich der Spule 2 ein großer Strombelag auf, der einen großen Druck auf das Schmelzgut 3 ausübt. Am oberen Rand des Tiegels 4 befindet sich ein Kurzschlußbügel 33, der eine gewisse Linearisierung des Magnetfelds bewirkt. Eine solche Linearisierung ist erforderlich, weil die Spule an ihrem oberen Rand abrupt aufhört und somit zunächst zu einem Knick in der magnetischen Feldstärke führt, aber andererseits das Fernfeld nur langsam abklingt. Dadurch, daß der Feldeinfall über den Tiegelrand mittels des Kurzschlußbügels oder -rings 33 stark reduziert wird, ergibt sich eine Feldschwächung im Bereich der Schmelzoberfläche und somit eine Begrenzung der Badüberhöhung. Dieser Kurzschlußring 33 liegt auf den Segmenten 5, 6 auf und ist mit diesen verbunden.

Die Spule 2 liegt an einer Stromversorgung 34, bei der es sich um eine Wechselstromquelle mit der Frequenz 1000 bis 5000 Hz handelt. Der durch die Wicklungen 29 bis 32 fließende Strom ist somit an allen Stellen gleich.

Bei der erfindungsgemäßen Schmelz-Induktionsanlage strömt das geschmolzene Schmelzgut 3 im Tiegel 4. Im unteren bis mittleren Spulenbereich strömt es nach innen, wo es nach oben und unten abgelenkt wird und wieder an die Schmelzenaußenseite nach unten strömt; dort sind auch die nach innen orientierten Kräfte am größten. Das im Bereich des Zentrums der Schmelze nach oben strömende Material ist an der Schmelzbadoberfläche sichtbar und kann Instabilitäten der Badkuppe verursachen. In den aufgrund des Strahlungsdrucks gebildeten Schmelzen-Stege ergibt sich eine passive Strömung, die durch Reibungskräfte der Kuppenhauptströmung erzeugt wird.

Bei praktischen Ausführungsformen der Erfindung liefert die Stromversorgung eine Spannung mit Frequenzen von 2500 Hz oder 5000 Hz. Die Eindringmaße errechnen sich dann über die bekannte Formel

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu K}}$$

bei Aluminium als Schmelzflüssigkeit zu 4,8 mm bzw. 3,4 mm und bei Titan als Schmelzflüssigkeit zu 13,3 mm bzw. 9,4 mm. Eine Frequenzerhöhung führt zu einer Verkleinerung des Eindringmaßes.

Eine weitere Variante der Erfindung, bei welcher die Stromstärken durch die Spulenwicklungen nicht überall gleich sind, zeigt die Fig. 4. Dort ist eine erste Teilspule 36 mit den Windungen 29, 30 im oberen Bereich vorgesehen, die an einer ersten Stromversorgung 35 liegen. Die Windungszahl dieser Teilspule ist relativ groß. Im unteren Bereich des Tiegels 4 ist eine zweite Teilspule 37 mit den Windungen 38 bis 41 vorgesehen. Diese zweite und kürzere Teilspule 37 kann an eine eigene Stromversorgung 42 gelegt werden und hat im Vergleich zur ersten Teilspule 36 eine kleinere Windungszahl.

Es ist jedoch auch möglich, was durch die gestrichelt gezeichneten Leitungen 43, 44 angedeutet ist, die Teilspule 36 und die Teilspule 37 parallel an eine gemeinsame Stromversorgung 35 oder 42 anzuschließen. Bei parallelgeschalteten Teilspulen 36, 37 ergibt sich im unteren Bereich des Tiegels 4 wegen der höheren Spulenströme und des höheren Strombelags der unteren Teilspule 37 ein höherer Strahlungsdruck als im oberen Bereich. Werden getrennte Stromversorgungen 35, 42 für die Teilspulen 36, 37 verwendet, so können die in die Teilspulen 36, 37 einfließenden Ströme so gewählt werden, daß sie den jeweils erforderlichen Strahlungsdruck aufbringen.

Mit der Bezugszahl 60 ist in der Fig. 4 die Schmelzbadkuppe bezeichnet. Diese Kuppe 60 soll möglichst wenig überhöht sein und durch den Strahlungsdruck nicht eingefurcht werden. Gegen eine Überhöhung kann, wie bereits erwähnt, die Maßnahme der Reduzierung der Feldstärke gewählt werden. Die Einfurchungen 61 bis 64 der Kuppe 60 sind im wesentlichen durch das Eindringen der elektromagnetischen Strahlung durch die Schlitz 12, 13 zwischen den Segmenten 5, 6, 7 bedingt. Wesentlich für die Eigenschaften der Badkuppe 60 ist somit das Verhältnis der Segmentbreite a zur Schlitzbreite b. Um dieses Verhältnis optimal festzulegen, sind verschiedene Aspekte zu beachten. Einerseits soll die Zahl der Segmente 5, 6, 7 möglichst groß sein, damit das elektromagnetische Feld durch viele Schlitz

12, 13 in die Schmelze 3 eindringen kann. Andererseits ist es jedoch erwünscht, daß ihre Anzahl nicht zu groß ist, damit die Längen des Stromwegs, in dem Wirbelströme induziert werden können, nicht zu groß werden.

Der Umfang des Tiegels 4 dividiert durch die Anzahl der Segmente 5, 6, 7 sollte eine solche Segmentbreite a ergeben, daß die Segmentbreite a mit der Eindringtiefe δ des Feldes in die Schmelze 3 vergleichbar oder sogar kleiner wird. Die Segmentbreite a bestimmt die Periodizität des Feldes in Umfangsrichtung. Bei kleiner Segmentbreite a haben deshalb die Ausbuchtungen oder Lamellen 65, 66, 67 an der Kuppe 60 an ihrer Spitze und ihrem Boden eine derart große Krümmung, daß sich die Oberflächenkräfte zum Abbau der Ausbuchtungen 65, 66, 67 verstärken. Um die Ausbildung von Ausbuchtungen oder Lamellen 65, 66, 67 an der Badkuppe 60 zu verhindern, kann, wie bereits erwähnt, die Feldstärke im Kuppenbereich verringert oder die Frequenz des Feldes erhöht werden. Es können jedoch auch schmale Segmente 5, 6, 7 verwendet werden.

Dadurch, daß das Magnetfeld radial nach innen eindringen muß, entstehen Verluste in den metallischen Segmenten 5, 6, 7. Diese Verluste sind durch Induktionsströme bedingt, die unerwünschte Wärmeverluste verursachen. Man kann diese Verluste begrenzen, indem man die Spalten 12, 13 zwischen den Segmenten 5, 6, 7 möglichst breit macht. Da die Spaltbreite b auf der zur Schmelze 3 gerichteten Seite möglichst schwach sein sollte, damit keine Schmelze nach außen dringen kann, bietet der sich nach außen radial aufweitende Spalt einen Kompromiß. Durch einen größeren Abstand zwischen den Segmenten 5, 6, 7 werden die Verluste durch die gegenseitige Stromverdrängung verringert. Für den Querschnitt der Segmente 5, 6, 7 gelten im Grunde die gleichen Konstruktionsprinzipien wie für die Induktorwindungen: Es sollen möglichst keine scharfen Kanten vorhanden sein, da an diesen große Wärmeverluste auftreten. Der Radius an den Kanten sollte größer $1,5 \delta$ bis 2δ sein. Die Breite b der Schlitz 12, 13 zwischen den Segmenten 5, 6, 7 kann sich in vertikaler bzw. axialer Richtung verändern. Beispielsweise ist es vorteilhaft, wenn sich die Schlitz 20 zwischen den Segmenten unterhalb der Schmelze 3, also am Boden 68, erweitern.

Die zwischen zwei Segmenten 5, 6, 7 herrschenden elektrischen Spannungen hängen nicht von der Breite b eines Schlitzes 12, 13 ab, sondern sie ergeben sich aus der Umlaufspannung, dividiert durch die Zahl der Segmente $5/6/7$. Die Segmente 5, 6, 7 werden durch das Feld der Induktionsspule 36, 37 zur Schmelze hin verbogen. Eine nach innen gerichtete Verformung der Segmente 5, 6, 7 ergibt sich auch durch die schmelzseitige Erwärmung, den sogenannten Ofenkasteneffekt. Die Segmente 5, 6, 7 können gegen diese Kräfte z. B. durch Isolierstoffelemente zwischen den Segmenten 5, 6, 7 abgestützt werden. Diese verhindern auch das Auslaufen der Schmelze bei Stromausfall. Die Isolierstoffe sollten ein bis zwei Spaltenbreiten nach innen versetzt sein. Der Boden 68 des Tiegels 4 ist zweckmäßigerweise als radial geschlitzter, wassergekühlter Block ausgeführt. Er ist im oberen Bereich gegen die Segmente 5, 6, 7 isoliert. Außerdem ist er in der Höhe verstellbar, so daß er optimal an die Schmelzhöhe angepaßt werden kann.

Bei einer Vorrichtung gemäß Fig. 4, die mehrere Teilspulen 36, 37 übereinander aufweist, ist es möglich, die Leistung, beginnend mit der unteren Teilspule 37, zu reduzieren, bis die Schmelze 3 von unten erstarrt, bis schließlich nur die oberste Spule 36 mit reduzierter Leistung betrieben wird, so daß die Schmelze 3 in unmittelbarer Nähe der Schmelzbadoberfläche noch eine Weile flüssig gehalten wird. Durch dieses Flüssighalten, auch "Hottopping" genannt, wird die Lunkerbildung auch im Blockkopf vermieden. Die untere Teilspule 37 kann auch mit einer niedrigeren Frequenz betrieben werden als die obere Teilspule 36.

Die Fig. 5 zeigt eine weitere Variante der Erfindung, bei welcher nur eine Spule 2 vorgesehen ist, die über die Wechselstromquelle 34 mit elektrischer Energie versorgt wird. Parallel zu dieser Spule 2 ist ein Kondensator 45 geschaltet, so daß die Spule 2 mit diesem Kondensator 45 einen Schwingkreis bildet. In Reihe zu diesem Parallelschwingkreis 2, 45 ist eine Induktivität 46 geschaltet, die eine Frequenzveränderung bewirkt und die über einen Schalter 50 kurzgeschlossen werden kann. Weiterhin parallel zu der Stromversorgung 34 und dem Parallelschwingkreis 2, 45 ist eine Gleichstromquelle 47 geschaltet, die dem Wechselstrom in der Spule einen Gleichstrom überlagert. Mit der Gleichstromquelle 47 wird erreicht, daß die Schmelzströmung beruhigt und die Badkuppenformung stabilisiert wird. Das magnetische Gleichfeld hat in diesem Fall dieselbe Richtung wie das Wechselfeld. Es ist jedoch auch möglich, das Gleichfeld senkrecht zum Wechselfeld zu legen und insbesondere im oberen Bereich der Schmelze vorzusehen. Es versteht sich, daß das Gleichfeld auch durch eine gesonderte Wicklung oder durch Permanentmagnete erzeugt werden kann.

Über dem Schmelzgut befindet sich eine zusätzliche Aufheiz-Quelle 48, die in der Fig. 5 nur symbolisch dargestellt ist. Es kann sich hierbei um eine Elektronen-Kanone, eine Plasmaquelle, einen fremdgespeisten Widerstandsheizer oder dergleichen handeln.

In dem Raum zwischen der Schmelzbadoberfläche 60 und der Heizquelle 48 kann ein reaktives Gas eingebracht werden, wenn z. B. ein Plasmabrenner oder eine Glimmentladungsanode verwendet wird. Damit können Nitride, Oxide o. ä. oder unerwünschte Verbindungen von diesen, die als Einschlüsse in der Schmelze schwimmen, chemisch zerstört werden.

Während des Aufschmelzens einer festen Charge wird der Boden 68 so verschoben, daß die Schmelzbadkuppe 60 in etwa an der gleichen Stelle relativ zum Tiegel 4 bzw. zur Spule 2 gehalten wird.

Die Aufteilung der eingestellten elektromagnetischen Leistung kann für die verschiedenen Vorgänge "Einschmelzen", "Temperaturhalten" und "Blockerstarren" jeweils eine andere sein.

In der Fig. 6 ist schematisch dargestellt, wie diese Leistungsdichteverteilung bei einer Anordnung mit mehreren Teilspulen aussehen kann.

Der Tiegel 4 sollte zur Erreichung eines hohen Wirkungsgrads sehr schlank ausgebildet sein. Um jedoch bei sehr hohen Tiegeln die Wärmebelastung der Spulen und Segmente zu begrenzen, sollte eine Leistungsverteilung angestrebt werden, wie sie in der Fig. 7 dargestellt ist.

Der Tiegel 4 hat, wie bereits erwähnt, beispielsweise ein Volumen von $5,5 \text{ dm}^3$. Er kann jedoch auch ein Volumen von 100 bis 1000 dm^3 haben.

10 Patentansprüche

1. Induktionsofen (1), mit

einem Tiegel (4) aus Metall oder einer Metall-Legierung für die Aufnahme von Material (3) aus Metall oder aus einer Metall-Legierung, der dieses Material (3) auf einer bestimmten Temperatur und innerhalb eines bestimmten hydrostatischen Druckbereichs hält, wobei dieser Tiegel (4) eine segmentierte Außenwand (5, 6, 7) aufweist, die in vertikaler Richtung geschlitzt ist, und zwar wenigstens in einem Bereich, der dem Material (3) gegenüberliegt; einer Einrichtung (8 bis 11) zum Kühlen der Außenwand (5, 6, 7) auf eine Temperatur, die unter der bestimmten Temperatur des Materials (3) liegt; einer Induktionsspule (2), die den Tiegel (4) umgibt und die das im Tiegel (4) befindliche Material (3) auf induktivem Weg erwärmt,

dadurch gekennzeichnet, daß sich die induktive Leistungsdichte des von der Induktionsspule (2) erzeugten Feldes in Abhängigkeit von den hydrostatischen Drücken des Materials (3) entlang der Koordinaten der Schwerkraft (Z) verändert, und zwar in der Weise, daß der elektromagnetische Strahlungsdruck entsprechend der höhenabhängigen Leistungsdichte dem Gravitationsdruck der Schmelze entgegenwirkt.

2. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die in das Material (3) induzierte Leistungsdichteverteilung so gewählt ist, daß das Material (3) außer im unmittelbaren Bereich einer Badkuppe (60) in der Nähe der Schlitze (12, 13) des Tiegels (4) abhebt, aber in den Mittelebereichen der Segmente (5, 6, 7) anliegt.

3. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß in dem Tiegel (4) Kühlkanäle (10, 11) eingelassen sind, die von einem Kühlmittel durchströmt werden.

4. Induktionsofen nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Kühlmittel Wasser ist.

5. Induktionsofen nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Kühlmittel flüssiges Metall ist, z. B. flüssiges Na oder NaK.

6. Induktionsofen nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Kühlmittel eine organische Flüssigkeit ist, z. B. ein schwerentflammbares Silikon-Öl.

7. Induktionsofen nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Kühlmittel flüssiges Salz ist, z. B. ein eutektisches Salzgemisch aus NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3 .

8. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Steigung der Induktionsspule (2) nach unten hin geringer wird und sich dadurch im unteren Bereich der Induktionsspule (2) ein höherer Strombelag ergibt, der in dem unteren Bereich des Materials (3) eine höhere elektromagnetische Leistung induziert.

9. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Induktionsspule (2) aus mehreren übereinander angeordneten Teilspulen (36, 37) besteht, die mit jeweils unterschiedlichen Strömen gespeist werden.

10. Induktionsofen nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die unteren Teilspulen (37) kürzer als die oberen Teilspulen (36) sind.

11. Induktionsofen nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die unteren Teilspulen (37) weniger Windungen als die oberen Teilspulen (36) haben.
- 5 12. Induktionsofen nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß für jede der Teilspulen (36, 37) eine eigene Stromversorgung (34, 42) vorgesehen ist.
- 10 13. Induktionsofen nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Teilspulen (36, 37) eine gemeinsame Stromversorgung (35; 43, 44) aufweisen, daß die Teilspulen (37, 38) parallel zu diesen Stromversorgungen (35, 43, 44) geschaltet sind und daß die Teilspulen (36, 37) unterschiedliche Windungszahlen (29, 30; 38 bis 41) besitzen.
- 15 14. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das in dem Tiegel (4) befindliche Material (3) von einem magnetischen Gleichfeld durchsetzt ist.
16. Induktionsofen nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß das magnetische Gleichfeld koaxial zur Tiegelachse verläuft.
- 20 17. Induktionsofen nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß das magnetische Gleichfeld im wesentlichen auf den Kopfbereich (60) des Materials (3) einwirkt.
- 25 18. Induktionsofen nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gleichfeld in verschiedene Abschnitte unterteilt ist, wobei die aufeinanderfolgenden Abschnitte jeweils unterschiedliche Polaritätsfolgen aufweisen.
- 30 19. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß oberhalb der Oberfläche (60) des Materials (3) eine Elektrode (50) vorgesehen ist, und daß zwischen dieser Oberfläche (60) und dieser Elektrode (50) ein reaktives Gas eingebracht wird, das durch eine zwischen der Elektrode (50) und der Oberfläche des Materials (3) angelegte Spannung zur Glimmentladung gebracht wird.
- 35 20. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß in Reihe zur Induktionsspule (2) zusätzliche Induktivitäten (46) geschaltet sind, um die Resonanzfrequenz zu erniedrigen.
21. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Schlitz im Tiegel (4) nur im von dem Material (3) abgewandten Bereich mit einem Isolator aufgefüllt sind.
- 40 22. Induktionsofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Frequenz der Wechselspannung, an der die Induktionsspule (2) liegt, variabel ist.

Claims

- 45 1. An induction furnace (1), having a crucible (4) of metal or a metal alloy for receiving material (3) of metal or of a metal alloy, this crucible (4) keeping this material (3) at a particular temperature and within a particular hydrostatic pressure range and having a segmented outer wall (5, 6, 7) which is slotted in the vertical direction, at least in a region opposite the material (3); this induction furnace (1) having a means (8 to 11) of cooling the outer wall (5, 6, 7) to a temperature below the particular temperature of the material (3); and having an induction coil (2) which surrounds the crucible (4) and heats the material (3) in the crucible (4) inductively, characterized in that the inductive power density of the field generated by the induction coil (2) alters in dependence on the hydrostatic pressures of the material (3) along the coordinate of gravity (Z), in such a way that the electromagnetic radiation pressure counters the gravitational pressure of the melt in accordance with the power density dependent on the level.
- 50 2. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that the distribution of power density induced in the material (3) is selected such that the material (3), other than in the direct region of a bath dome (60), moves away in the vicinity of the slots (12, 13) of the crucible (4) but lies close in the central regions of the segments (5, 6, 7).
- 55 3. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that cooling channels (10, 11) through which a coolant flows are let into the crucible (4).

EP 0 391 067 B1

4. An induction furnace according to Claim 3, characterized in that the coolant is water.
5. An induction furnace according to Claim 3, characterized in that the coolant is molten metal, for example molten Na or NaK.
- 5 6. An induction furnace according to Claim 3, characterized in that the coolant is an organic liquid, for example a barely inflammable silicone oil.
- 10 7. An induction furnace according to Claim 3, characterized in that the coolant is liquid salt, for example a eutectic salt mixture of NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3 .
- 15 8. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that the lead of the induction coil (2) decreases towards the bottom and consequently there is produced in the lower region of the induction coil (2) a greater specific current density, inducing a greater electromagnetic power in the lower region of the material (3).
- 20 9. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that the induction coil (2) comprises a plurality of coil portions (36, 37) which are arranged one above the other and are each fed with different currents.
- 25 10. An induction furnace according to Claim 9, characterized in that the lower coil portions (37) are shorter than the upper coil portions (36).
- 30 11. An induction furnace according to Claim 9, characterized in that the lower coil portions (37) have fewer windings than the upper coil portions (36).
- 35 12. An induction furnace according to Claim 9, characterized in that a separate power supply (34, 42) is provided for each of the coil portions (36, 37).
- 40 13. An induction furnace according to Claim 9, characterized in that the coil portions (36, 37) have a common power supply (35; 43, 44), in that the coil portions (37, 38) are connected in parallel to these power supplies (35, 43, 44) and in that the coil portions (36, 37) have different numbers of windings (29, 30; 38 to 41).
- 45 14. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that a continuous magnetic field passes through the material (3) in the crucible (4).
- 50 15. An induction furnace according to Claim 14, characterized in that the continuous magnetic field runs coaxially with respect to the crucible axis.
- 55 16. An induction furnace according to Claim 14, characterized in that the continuous magnetic field runs perpendicular to the crucible axis.
17. An induction furnace according to Claim 14, characterized in that the continuous magnetic field acts substantially on the top region (60) of the material (3).
18. An induction furnace according to Claim 15, characterized in that the continuous field is divided into different sections, the successive sections each having different polarity sequences.
19. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that an electrode (50) is provided above the surface (60) of the material (3), and in that there is introduced between this surface (60) and this electrode (50) a reactive gas which is made to undergo glow discharge as a result of a voltage applied between the electrode (50) and the surface of the material (3).
20. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that additional inductors (46) are connected in series with the induction coil (2) in order to reduce the resonant frequency.
21. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that the slots in the crucible (4) are filled with an insulator only in the region remote from the material (3).
22. An induction furnace according to Claim 1, characterized in that the frequency of the alternating voltage applied

to the induction coil (2) is variable.

Revendications

- 5
1. Four à induction (1), comprenant
- un creuset (4) en métal ou en alliage métallique pour la réception de matière (3) en métal ou en alliage métallique, qui maintient cette matière (3) à une certaine température à l'intérieur d'une certaine zone de pression hydrostatique, ce creuset (4) présentant une paroi externe segmentée (5, 6, 7), qui est fendue verticalement, et, ce, au moins dans une zone qui est opposée à la matière (3);
- 10 un dispositif (8 à 11) pour le refroidissement de la paroi externe (5, 6, 7) à une température inférieure à la température déterminée de la matière (3);
- une bobine à induction (2)
- 15 qui entoure le creuset (4) et qui réchauffe la matière (3) se trouvant dans le creuset (4) par voie inductive,
- caractérisé en ce que la puissance volumique inductive du champ généré par la bobine à induction (2) est variable en fonction des pressions hydrostatiques de la matière (3) le long des coordonnées de la pesanteur (Z) et, ce, de manière que la pression de rayonnement électromagnétique s'oppose à la pression de gravitation de la matière en fusion en fonction de la puissance volumique dépendant de la hauteur.
- 20
2. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que la répartition de la puissance volumique induite dans la matière (3) est sélectionnée de manière que la matière (3) se soulève à proximité des fentes (12,13) du creuset (4), excepté à proximité immédiate d'une coupole de bain (60), mais s'applique dans les zones centrales des segments (5, 6, 7).
- 25
3. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que dans le creuset (4) sont ménagés des canaux de refroidissement (10, 11) qui sont traversés par un agent réfrigérant.
- 30
4. Four à induction selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'agent réfrigérant est de l'eau.
5. Four à induction selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'agent réfrigérant est du métal liquide, par exemple du Na ou NaK liquides.
- 35
6. Four à induction selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'agent réfrigérant est un liquide organique, par exemple une huile siliconée difficilement inflammable.
7. Four à induction selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'agent réfrigérant est un sel liquide, par exemple un mélange salin eutectique en NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3 .
- 40
8. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'inclinaison de la bobine à induction (2) devient plus faible vers le bas et il en résulte ainsi dans la zone inférieure de la bobine à induction (2) une densité de courant plus élevée qui induit, dans la zone inférieure de la matière (3), une puissance électromagnétique plus élevée.
- 45
9. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que la bobine à induction (2) se compose de plusieurs bobines partielles (36, 37), disposées les unes sur les autres, qui sont alimentées par des courants différents.
- 50
10. Four à induction selon la revendication 9, caractérisé en ce que les bobines partielles inférieures (37) sont plus courtes que les bobines partielles supérieures (36).
11. Four à induction selon la revendication 9, caractérisé en ce que les bobines partielles inférieures (37) ont moins de spires que les bobines partielles supérieures (36).
- 55
12. Four à induction selon la revendication 9, caractérisé en ce que pour chacune des bobines partielles (36, 37), il est prévu une alimentation en courant individuelle (34, 42).

EP 0 391 067 B1

- 5
13. Four à induction selon la revendication 9, caractérisé en ce que les bobines partielles (36, 37) présentent une alimentation en courant commune (35; 43, 44), en ce que les bobines partielles (37, 38) sont montées en parallèle à ces alimentations en courant (35, 43, 44) et en ce que les bobines partielles (36, 37) comportent des nombres de spires différents (29, 30 ; 38 à 41).
- 10
14. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que la matière (3), se trouvant dans le creuset (4), est traversée par un champ continu magnétique.
- 15
15. Four à induction selon la revendication 14, caractérisé en ce que le champ continu magnétique s'étend coaxialement à l'axe de creuset.
16. Four à induction selon la revendication 14, caractérisé en ce que le champ continu magnétique s'étend perpendiculairement à l'axe du creuset.
- 17
17. Four à induction selon la revendication 14, caractérisé en ce que le champ continu magnétique agit sensiblement sur la zone de tête (60) de la matière (3).
18. Four à induction selon la revendication 15, caractérisé en ce que le champ continu est divisé en différentes parties, les parties successives présentant chacune des suites de polarité différentes.
- 20
19. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'au-dessus de la surface (60) de la matière (3), il est prévu une électrode (50), et en ce qu'entre cette surface (60) et cette électrode (50) est introduit un gaz réactif qui est amené, par une tension appliquée entre l'électrode (50) et la surface de la matière (3), à l'effluve électrique.
- 25
20. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que des inductances supplémentaires (46) sont connectées en série avec la bobine à induction (2) pour diminuer la fréquence de résonance.
- 30
21. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que les fentes du creuset (4) ne sont remplies d'un isolant que dans la zone opposée à la matière (3).
- 35
22. Four à induction selon la revendication 1, caractérisé en ce que la fréquence de la tension alternative, appliquée à la bobine à induction (2), est variable.
- 40
- 45
- 50
- 55

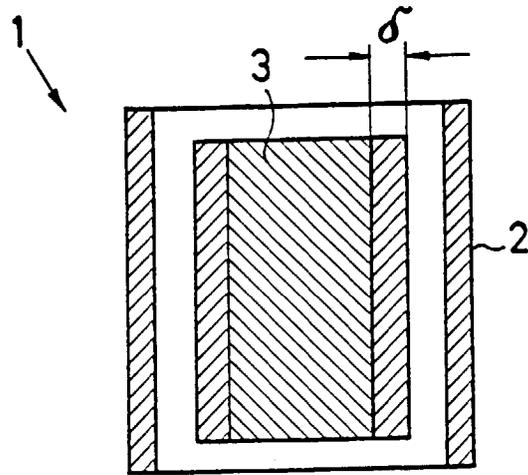


FIG. 1a

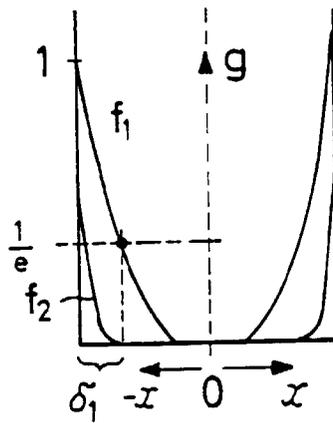


FIG. 1b

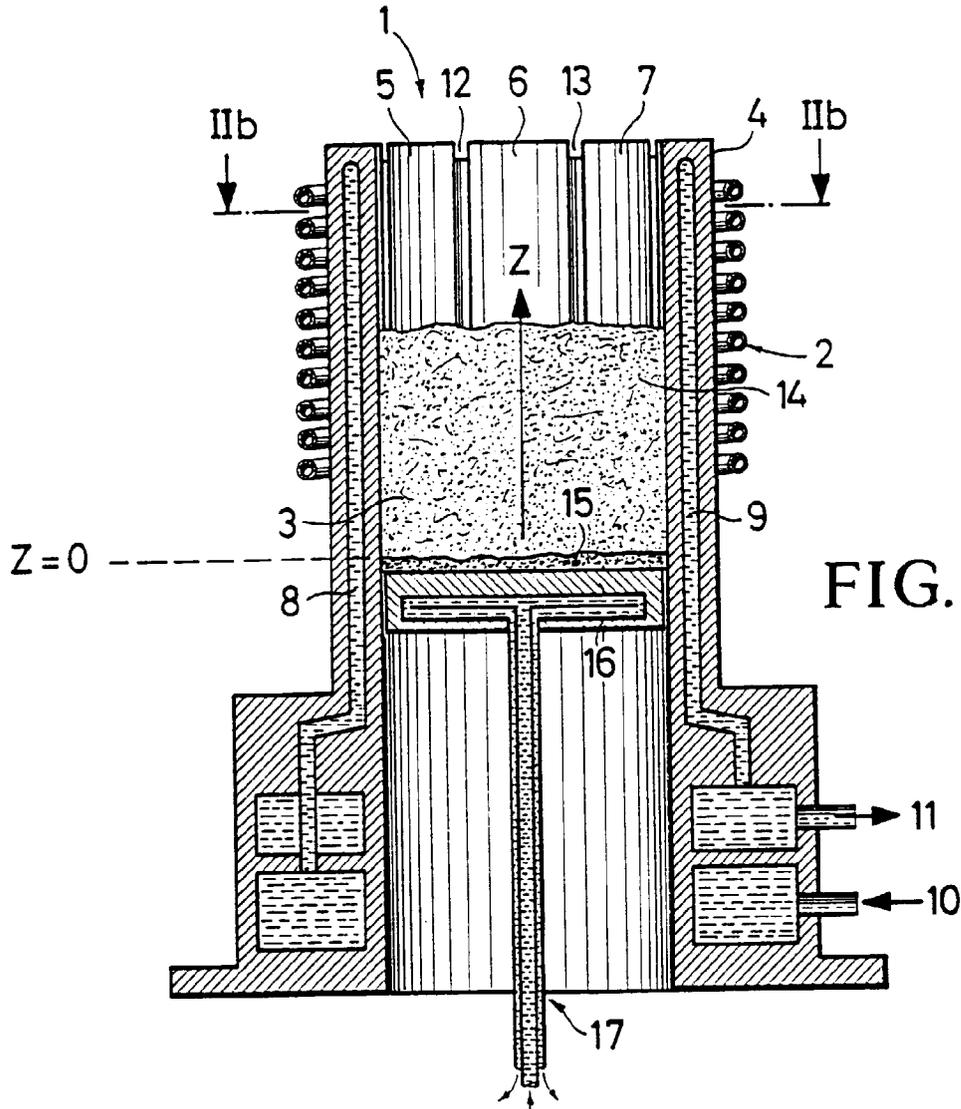


FIG. 2a

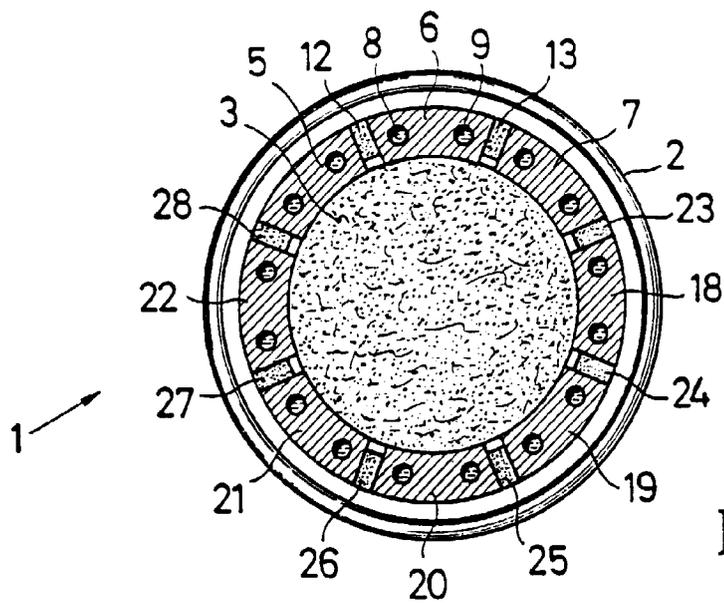


FIG. 2b

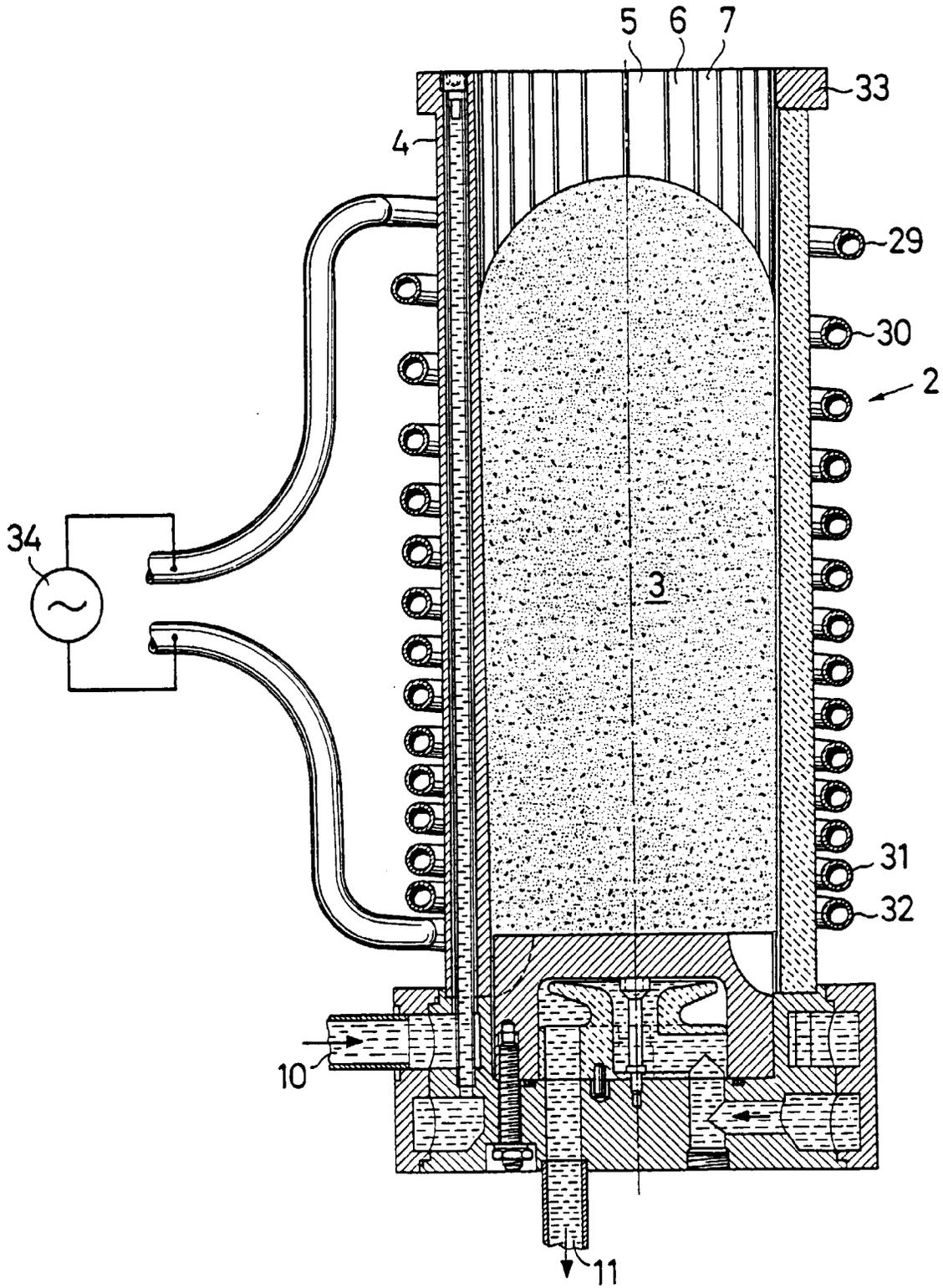


FIG.3

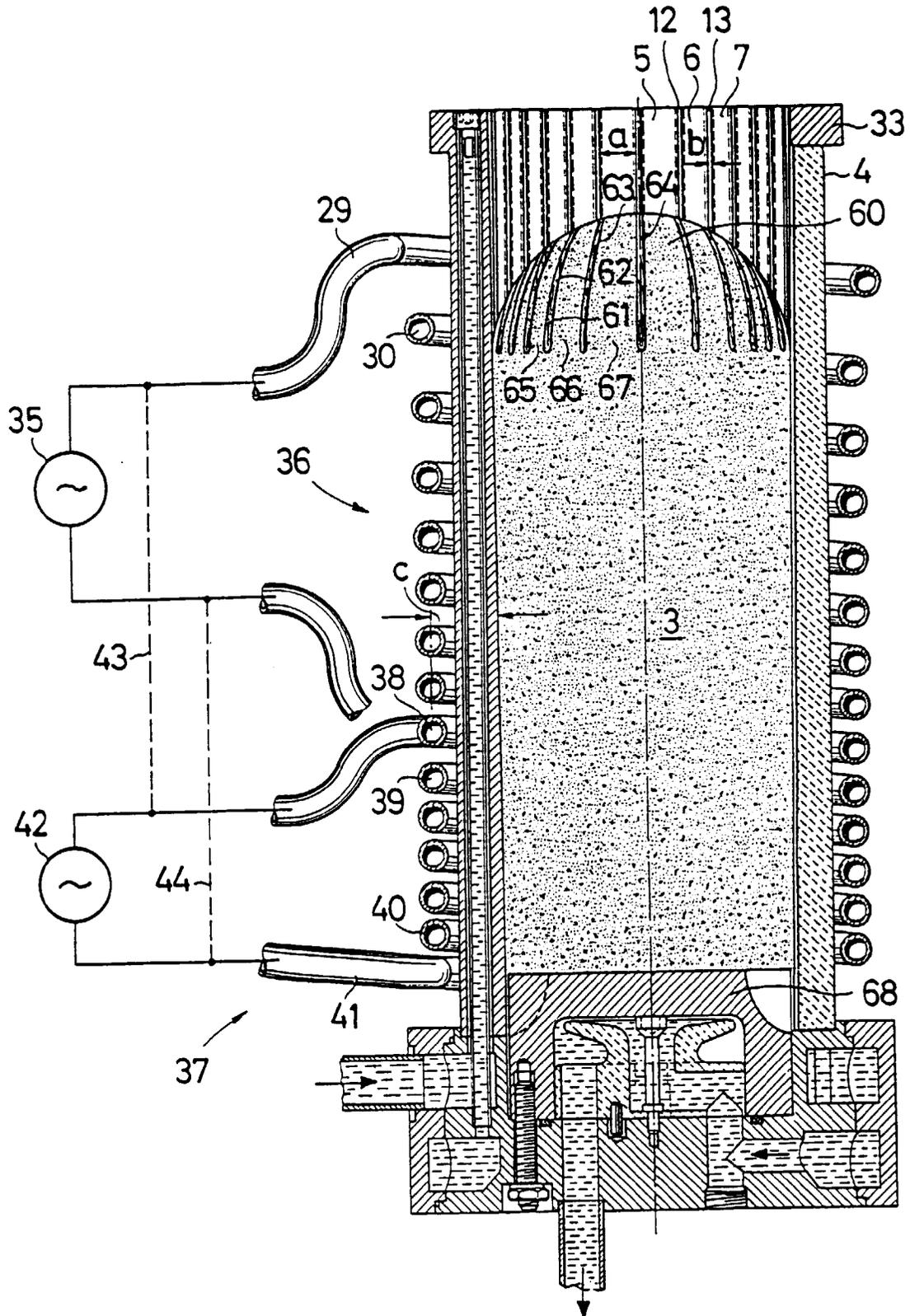


FIG. 4

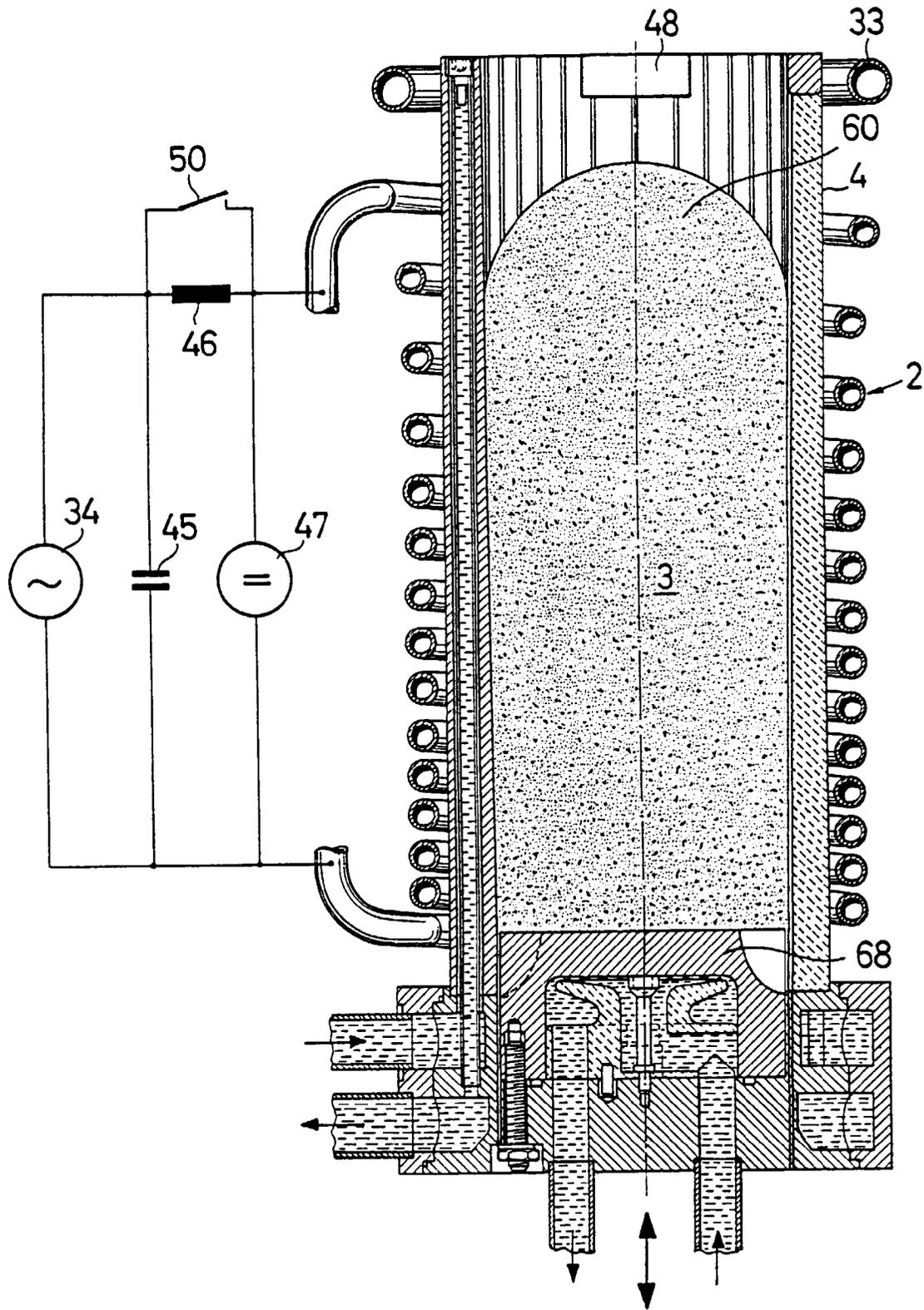


FIG. 5

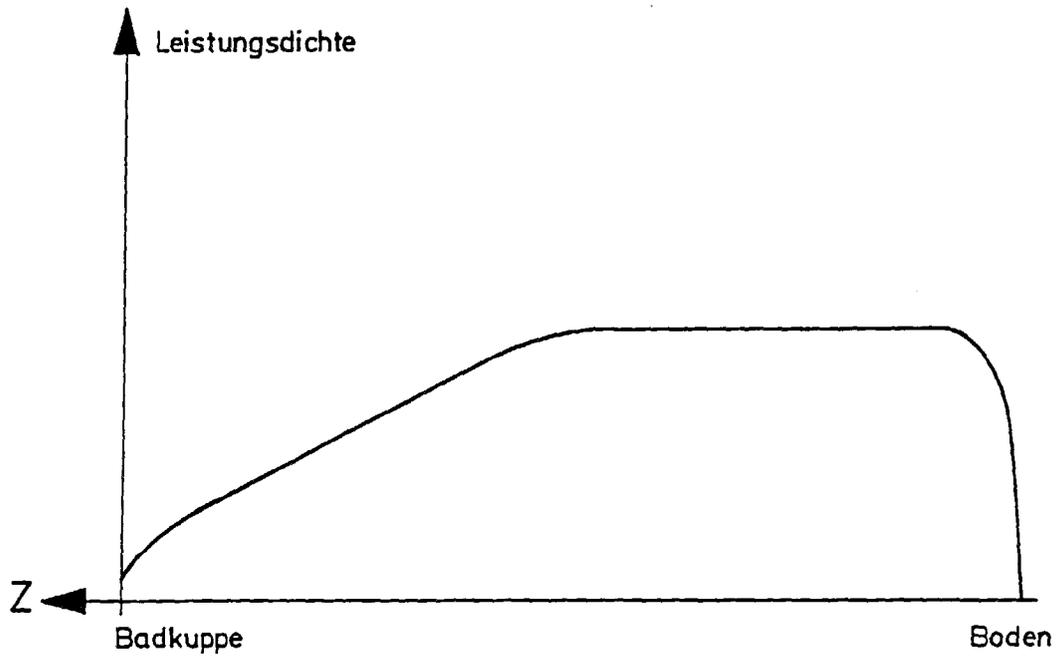


FIG. 7

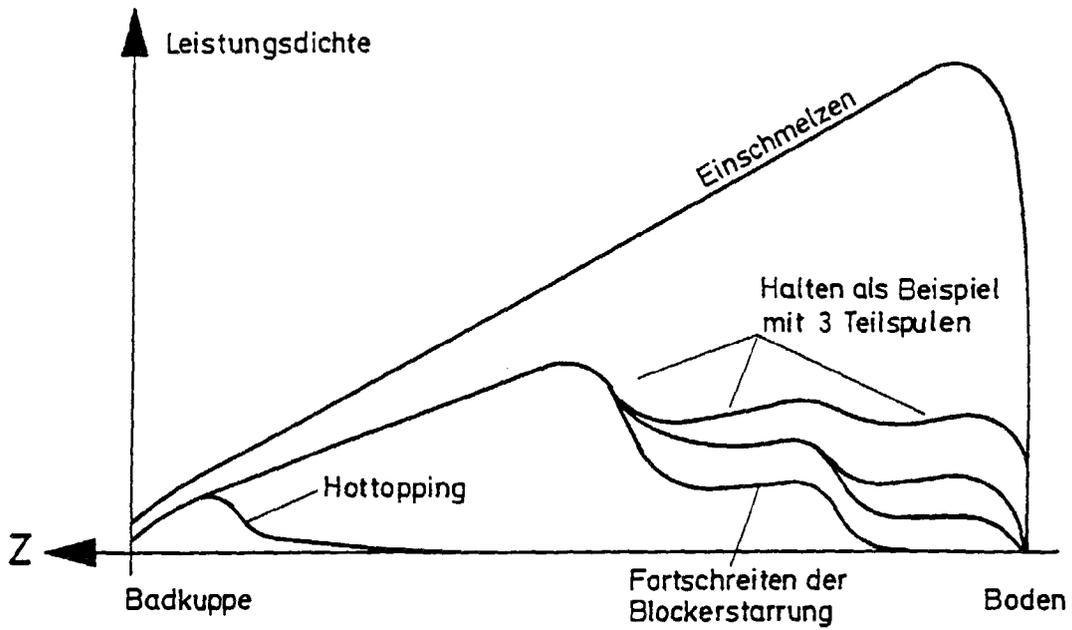


FIG. 6