

(19)



(11)

EP 2 181 563 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
25.08.2010 Patentblatt 2010/34

(51) Int Cl.:
H05B 6/02 (2006.01) H05B 6/14 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **08784690.3**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2008/005647

(22) Anmeldetag: **10.07.2008**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2009/012896 (29.01.2009 Gazette 2009/05)

(54) **INDUKTIONSHETZVERFAHREN**

INDUCTION HEATING METHOD

PROCÉDÉ DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

- **FÜLBIER, Christoph**
53797 Lohmar (DE)
- **HAHN, Ingolf**
53177 Bonn (DE)

(30) Priorität: **26.07.2007 DE 102007034970**

(74) Vertreter: **Prietsch, Reiner**
Dipl.-Ing. Reiner Prietsch
Patentanwalt
Postfach 11 19
82141 Planegg (DE)

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
05.05.2010 Patentblatt 2010/18

(73) Patentinhaber: **Zenergy Power GmbH**
53359 Rheinbach (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-01/35702 WO-A-2004/066681
DE-A1-102005 061 670 GB-A- 2 221 348
JP-A- 8 031 671 US-A- 3 842 234
US-A- 4 761 527

(72) Erfinder:
 • **BÜHRER, Carsten**
53125 Bonn (DE)

EP 2 181 563 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum induktiven Erwärmen eines Billets aus einem elektrisch leitenden Werkstoff durch Relativbewegung, insbesondere Erzeugen einer Drehung zwischen dem Billet und einem Magnetfeld, das mittels mindestens einer gleichstromgespeisten supraleitenden Wicklung auf einem Eisenkern erzeugt wird.

[0002] Ein solches Verfahren zeigt die DE 10 2005 061 670.4. Zur Durchführung des Verfahrens kann beispielsweise ein in einer drehangetriebenen Einspannvorrichtung eingespanntes zylinderförmiges Billet mit konstanter Drehzahl um seine Zylinderachse in einem Magnetfeld, das mittels eines konstanten Stroms durch die supraleitende Wicklung erzeugt wird, gedreht werden. Dadurch wird in dem Billet ein weitgehend konstanter Strom induziert. In der Realität ist das Billet jedoch in der Regel nicht optimal zylindrisch und/oder nicht exakt eingespannt, so dass es nicht um seine Zylinderachse gedreht wird. Dadurch verändert sich der magnetische Fluss durch das Billet auch betragsmäßig, so dass entsprechend ein betragsmäßig nicht konstanter Induktionsstrom in dem Billet induziert wird. Der Induktionsstrom $I_{\text{ind}}(t)$ alterniert mit der Drehfrequenz f , d.h. $I_{\text{ind}}(t) = I_{\text{ind}}(t + f^{-1})$. Durch den zeitlich nicht konstanten Induktionsstrom in dem Billet wird ein sich zeitlich entsprechend veränderndes Magnetfeld erzeugt, welches die supraleitende Wicklung durchdringt und dort eine Spannung induziert. Dieser Effekt wird als Rückinduktion und die entsprechende Spannung als Rückinduktionsspannung bezeichnet. Aufgrund dieser sich zeitlich verändernden Rückinduktionsspannung fließt durch die supraleitende Wicklung kein zeitlich konstanter sondern ein zeitlich variabler Strom, der zu unerwünschten Verlusten, sogenannten Rückinduktionsverlusten in der supraleitenden Wicklung führt.

[0003] Ebenso wird bei der Erwärmung nicht zylindrischer, stabförmiger Billets, z.B. mit rechteckigem oder ovalem Querschnitt, durch Drehung der Billets ein ständig alternierender Induktionsstrom erzeugt, der eine entsprechend alternierende Rückinduktionsspannung und damit entsprechende Rückinduktionsverluste bewirkt.

[0004] Zeitlich variierende Rückinduktionsspannungen und damit Rückinduktionsverluste treten unabhängig von der Form des Billets insbesondere beim Beginn und am Ende der Induktionserwärmung auf, wenn das Billet in Rotation versetzt bzw. angehalten wird. Grundsätzlich treten die Rückinduktionsverluste bei jeder Änderung der Drehgeschwindigkeit auf.

[0005] Diese Rückinduktionsverluste müssen durch eine entsprechend leistungsfähige Stromquelle ausgeglichen werden und erhöhen die für die supraleitende Wicklung notwendige Kühlleistung.

[0006] Die US 3 842 243 schlägt vor, ein elektrisch leitendes Billet in einem magnetischen Wechselfeld zu erwärmen. Zur Führung des magnetischen Flusses durch das Billet sitzt ein wechselstromgespeicherter Leiter

in einem U-förmigen Joch. Durch eine gleichstromgespeiste Zusatzspule, die auf einem Abschnitt des Jochs sitzt, kann der Abschnitt in die magnetische Sättigung getrieben werden. Deshalb wird der magnetische Fluss des Wechselfeldes nicht mehr vollständig zum Billet geführt, und dieses wird in dem entsprechenden Bereich lokal weniger erwärmt.

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde die Rückinduktionsverluste in der supraleitenden Wicklung bei Durchführung des einleitend genannten Verfahrens zu verringern.

[0008] Verfahrensmäßig ist diese Aufgabe durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen 2 bis 7 angegeben. Vorrichtungen insbesondere zur Durchführung der Verfahren sind Gegenstand des Anspruches 8. Weiterbildungen der Vorrichtungen sind in den Ansprüchen 9 bis 15 angegeben.

[0009] Bei allen Verfahren wird wenigstens ein Billet relativ zu einem Magnetfeld bewegt. Es kommt dabei nicht darauf an, ob das Magnetfeld um das Billet gedreht wird oder umgekehrt. Gemäß dem Verfahren nach dem Anspruch 1 wird in der supraleitenden Wicklung ein Gleichstrom mit einem Wert erzeugt und aufrecht erhalten, der in dem Eisenkern zumindest im Bereich der Wicklung eine magnetische Flussdichte erzeugt, bei der die relative Permeabilität des Werkstoffes des Eisenkerns kleiner als im stromlosen Zustand der Wicklung ist. Weil sich die relative Permeabilität reduziert, vermindert sich die Rückinduktion und damit der Verlust in der supraleitenden Wicklung. Gleichzeitig bleibt die das Magnetfeld der Wicklung führende Wirkung des Eisenkerns erhalten. Im Ergebnis wird die Rückinduktion verringert.

[0010] Werden zwei oder mehr Billets gleichzeitig in einem von der supraleitenden Wicklung erzeugten Magnetfeld gedreht, kann nach einer alternativen oder optionalen Lösung des Problems die Lage der Billets zueinander so geregelt werden, dass die von den alternierenden Induktionsströmen der Billets erzeugten Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren. Vereinfacht dargestellt, ist unter der Annahme eines im Bereich eines Billets homogenen Magnetfeldes der magnetische Fluss durch das Billet etwa proportional zur Projektionsfläche des Billets auf eine Ebene senkrecht zu den Feldlinien. Bei Erwärmung eines nicht zylindrischen Billets in dem Magnetfeld verändert sich die Projektionsfläche mit jeder Winkeländerung. Der Kern dieser Lösung besteht darin, die Lage zweier oder mehrerer Billets zueinander so zu regeln, dass sich die summierte Projektionsfläche aller Billets bei deren Bewegung im Magnetfeld nicht oder nur möglichst wenig ändert. Entsprechend ändert sich dann auch der summierte magnetische Fluss durch die Billets nicht oder nur minimal, was zu einer minimierten Rückinduktionsspannung in der Wicklung führt. Man kann auch sagen, dass die den einzelnen Billets zuzuordnenden, d.h. durch deren jeweilige Änderungen des magnetischen Flusses verursachten Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren.

[0011] Dazu können beispielsweise zwei identische quaderförmige Billets mit quadratischem Querschnitt, mit gleicher Winkelgeschwindigkeit jeweils um ihre Längsachsen gedreht und mit diesen Längsachsen zumindest etwa orthogonal zu den Feldlinien des von der stromdurchflossenen Wicklung erzeugten Magnetfelds ausgerichtet werden, wobei die Lage der Billets zueinander so geregelt wird, dass die beiden Billets gegeneinander um 45° um ihre parallelen Längsachsen verdreht sind, denn dann nimmt der magnetische Fluß durch das eine der beiden Billets in dem selben Maße zu, wie er durch das andere Billet abnimmt. Hat der Fluss durch das eine Billet sein Maximum erreicht, nimmt er anschließend wieder ab, wobei der Fluss durch das andere Billet im gleichen Maße zunimmt. Der summierte magnetische Fluss durch die Billets ist im Idealfall konstant. Dann löschen sich die den einzelnen Billets zuzuordnenden Rückinduktionsspannungen durch subtraktives Superponieren zumindest teilweise aus. Der gleiche Effekt, wenn auch nicht so ausgeprägt, wird erreicht, wenn z.B. zwei quaderförmige Billets mit nicht kongruenten Querschnittsflächen gleichzeitig erwärmt werden. Dies gilt insbesondere für quaderförmige Billets mit ausgeprägtem Rechteckquerschnitt.

[0012] Nach einer weiteren alternativen oder optionalen Lösung kann bei gleichzeitigem induktiven Erwärmen von zwei oder mehr Billets durch Drehen in einem von einer gleichstromgespeisten supraleitenden Wicklung erzeugten Magnetfeld die Relativbewegung der Billets zueinander so geregelt werden, dass die von den zeitlich veränderlichen Induktionsströmen der Billets erzeugten Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren (Anspruch 2). Auch bei dieser Lösung geht es wie bei den in den beiden vorstehenden Absätzen beschriebenen Verfahren darum, die Billets in einem Magnetfeld so zu drehen, dass deren summierte Projektionsfläche zumindest weitgehend konstant ist. Darüberhinaus kann durch die Regelung der Bewegung der Billets relativ zueinander alternativ oder optional die sich aufgrund ändernder Rotationsgeschwindigkeiten der einzelnen Billets relativ zu dem Magnetfeld summierte zeitliche Änderung des magnetischen Flusses durch die Billets minimiert werden. Beispielsweise können zwei vorzugsweise identische, z.B. zylindrische um ihre jeweilige Längsachse gedrehte Billets gegensinnig und vorzugsweise mit betragsmäßig gleicher Winkelgeschwindigkeit gedreht werden (Anspruch 3). Dadurch haben die den einzelnen Billets zuzuordnenden Rückinduktionen beim Start und am Ende der Erwärmung, d.h. beim Anfahren bzw. beim Stoppen der Drehbewegung, verschiedene Vorzeichen, so dass im Idealfall beim Starten und beim Stoppen eine Auslöschung der effektiven Rückinduktionsspannung in der Wicklung durch subtraktives Superponieren der den einzelnen Billets zuzuordnenden Rückinduktionsspannungen erfolgt.

[0013] Natürlich lässt sich das Verfahren auch beim gleichzeitigen Erwärmen unterschiedlicher Billets durchführen. Sofern die Querschnitte der Billets Symmetrien

besitzen, lassen sich diese gezielt ausnutzen. Beispielsweise kann man ein erstes der zylindrischen Billets aus obigem Beispiel gegen ein stabförmiges mit quadratischem Querschnitt ersetzen und das zweite zylindrische Billet durch ein stabförmiges Billet mit regelmäßigem oktaedrischem Querschnitt ersetzen. Nun wird das erste Billet mit betragsmäßig doppelter Winkelgeschwindigkeit wie das zweite und gegensinnig zu diesem gedreht. Unabhängig von der Form sind die Billets vor dem Start der Drehung vorzugsweise so gegeneinander auszurichten, daß der magnetische Fluß mit Start der Drehbewegung durch beide Billets entweder zunächst zunimmt oder zunächst abnimmt. Vorzugsweise sind beim Start der Drehbewegung die Projektionsflächen der beiden Billets auf eine Ebene senkrecht zum magnetischen Fluss beide maximal oder beide minimal. Werden die beiden Billets gleichsinnig gedreht (bei betragsmäßig unverändertem Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten zueinander), sind die Billets vor dem Start so auszurichten, dass mit dem Start der Drehbewegung der magnetische Fluß durch eines der Billets zunächst abnimmt und durch das andere zunächst zunimmt. In diesem Fall ist beim Start der Drehbewegung die Projektionsfläche eines Billets vorzugsweise maximal und die Projektionsfläche des anderen Billets minimal. In beiden Fällen verändert sich der magnetische Fluß durch die beiden Billets gegenläufig, so dass die den einzelnen Billets zuzuordnenden Rückinduktionsspannungen unterschiedliche Vorzeichen haben und subtraktiv superponieren.

[0014] Als supraleitende Wicklung kann beispielsweise ein bandförmiger Hochtemperatursupraleiter (HTSL) verwendet werden. Als HTSL werden z.B. Kuprat-Supraleiter bezeichnet, d.h. Seltenerd Kupfer-Oxide, wie z.B. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

[0015] Der Wert des Gleichstroms kann durch eine an die Wicklung angeschlossene, geregelte Stromquelle zumindest im Wesentlichen konstant gehalten werden. Aufgrund der geringen Rückinduktion kann diese Konstantstromquelle einen geringeren Regelungsbereich haben und damit kostengünstiger als bei Durchführung des Verfahrens nach dem Stand der Technik sein.

[0016] Die Vorrichtung insbesondere zur Durchführung eines der vorstehend beschriebenen Verfahren hat eine supraleitende Wicklung auf einem Eisenkern, eine Gleichstromquelle zum Erzeugen eines Gleichstroms in der Wicklung, mindestens eine Einspannvorrichtung für ein Billet aus einem elektrisch leitenden Material und einen Drehantrieb zum Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Wicklung und der Einspannvorrichtung. In einer Ausführungsform ist der Wert des in der Wicklung durch die Gleichstromquelle erzeugten Gleichstroms so eingestellt, dass die relative Permeabilität des Eisenkerns zumindest im Bereich der Wicklung gegenüber dem stromlosen Zustand der Wicklung reduziert ist (Anspruch 8).

[0017] Hat die Vorrichtung mindestens eine weitere drehangetriebene Einspannvorrichtung, so können die Einspannvorrichtungen optional oder alternativ gegen-

sinnig und vorzugsweise mit betragsmäßig etwa gleicher Winkelgeschwindigkeit angetrieben sein (Anspruch 9). Beispielsweise können die Einspannvorrichtungen über entsprechend geregelte Antriebsmotoren verfügen. Alternativ können auch mindestens zwei Einspannvorrichtungen mit einem gemeinsamen Motor angetrieben werden. Ein Getriebe mit gegensinnig und mit betragsmäßig gleicher Winkelgeschwindigkeit laufenden Abtrieben überträgt die Motorleistung auf die Einspannvorrichtungen.

[0018] Alternativ oder zusätzlich kann die Vorrichtung Mittel zum Bestimmen der von den zeitlich variierenden Induktionsströmen in den Billets jeweils hervorgerufenen Rückinduktionsspannungen haben. Durch eine Steuerung, welche die zuvor bestimmten Rückinduktionsspannungen auswertet, werden die Drehantriebe der Einspannvorrichtungen so gesteuert, dass die jeweils von den Billets hervorgerufenen Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren (Anspruch 10). Beispielsweise kann die Lage der Billets zueinander und/oder die Relativbewegung der Billets zueinander durch die Steuerung geregelt werden.

[0019] Der verwendete Eisenkern kann im einfachsten Fall ein Stab sein. An beiden Enden des Stabes kann ein Billet relativ zu dem aus dem Stab austretenden Magnetfeld bewegt, insbesondere gedreht werden. Der magnetische Rückschluss erfolgt durch den freien Raum.

[0020] Besser kann der verwendete Eisenkern ein zumindest näherungsweise C-förmiges Joch sein. Ein zumindest näherungsweise C-förmiges Joch hat einen Luftspalt zwischen zwei Polschuhen des ansonsten im Querschnitt ringförmig geschlossenen Jochs in dem das Billet gedreht werden kann. Ein solcher Eisenkern ermöglicht eine gute Führung des magnetischen Flusses durch ein zu erwärmendes Billet. Im Vergleich zum Stab erfolgt auch der magnetische Rückschluss durch den Eisenkern.

[0021] Nach einer bevorzugten Ausführungsform ist der Eisenkern ein etwa E-förmiges Joch mit je einem Luftspalt zwischen dem Mittelschenkel und dem jeweiligen Endschenkel zur Aufnahme je eines Billets. Die Wicklung ist vorzugsweise auf dem Mittelschenkel angeordnet. Ein solcher Eisenkern ermöglicht mit nur einer Wicklung gleichzeitig zwei Billets zu erwärmen und auch den magnetischen Rückfluss durch den Eisenkern zu führen. Dazu wird in jedem der Luftspalte je ein Billet relativ zum Magnetfeld bewegt, vorzugsweise in dem Luftspalt gedreht.

[0022] Vorzugsweise besteht der Eisenkern zumindest teilweise aus geschichteten Blechen. Dadurch werden mögliche Wirbelströme in dem Eisenkern reduziert. Entsprechend sinkt die den Eisenkern erwärmende Wirbelstromverlustleistung und die Maßnahmen zur Kühlung des Eisenkerns können geringer ausfallen. Gleichzeitig wird der mögliche Wärmeeintrag vom Eisenkern auf die supraleitende Wicklung reduziert.

[0023] Besonders bevorzugt sind die Bleche zumindest teilweise etwa orthogonal zu der Ebene geschichtet,

in der der in dem Billet induzierte Strom zum überwiegenden Teil fließt. Dies ermöglicht eine gute Führung des Magnetfeldes bei geringen Wirbelstromverlusten.

[0024] Vorzugsweise wird der Querschnitt im Bereich der Wicklung kleiner als außerhalb der Wicklung gewählt. Dadurch wird die Rückinduktion nochmals verringert.

[0025] Anhand der Zeichnung wird die Erfindung weiter erläutert. Es zeigt jeweils schematisch vereinfacht und beispielhaft:

Fig. 1 die Ansicht eines Induktionsheizers,

Fig. 2a ein Magnetsystem eines Induktionsheizers mit einem stabförmigen Eisenkern,

Fig. 2b eine Seitenansicht des Magnetsystems aus Fig. 2a,

Fig. 3a ein Magnetsystem mit einem C-förmigen Joch als Eisenkern,

Fig. 3b das Magnetsystem aus Fig. 3a in der Frontansicht,

Fig. 4a ein Magnetsystem mit einem E-förmigen Joch als Eisenkern,

Fig. 4b das Magnetsystem aus Fig. 4a in der Frontansicht und

Fig. 5 ein Beispiel der Rückinduktionsspannung als Funktion des Wicklungsstroms.

[0026] Der Induktionsheizer in Fig. 1 dient zum Erwärmen eines Billets 10 durch Drehen des Billets 10 in einem durch ein Magnetsystem 50 erzeugten Magnetfeld. Dazu ist das Billet 10 zwischen einem rechten und einem linken Andruckelement 2a bzw. 2b einer Einspannvorrichtung eingespannt und durch einen Motor 1 drehangetrieben. Ein Getriebe 3 verbindet die Motorwelle mit der Welle der in Richtung der beidseitigen Pfeile verschiebbaren Einspannvorrichtung 2a.

[0027] Das Magnetsystem 50 kann, wie in Fig. 2a und 2b stark vereinfacht gezeigt, eine gleichstromgespeiste supraleitende Wicklung 60 auf einem stabförmigen Eisenkern 55.2 umfassen. Zwischen der Wicklung 60 und dem Eisenkern 55.2 ist ein Isolationselement 61, z.B. ein vakuumierter Hohlraum, welches den Wärmeeintrag in die Wicklung 60 reduziert (nur Fig. 2b). Der stabförmige Eisenkern 55.2 führt das durch die gleichstromgespeiste Wicklung 60 erzeugte Magnetfeld (nicht dargestellt), welches an den beiden Stirnflächen 56.2, 57.2 des Eisenkerns 55.2 wie aus einer Linse austritt und über einen Luftspalt in die dort befindlichen Billets 10 eintritt. Werden die Billets 10 in dem Magnetfeld bewegt, z.B. gedreht, so verändert sich der magnetische Fluss relativ zum Billet 10 und es wird ein Induktionsstrom in dem Billet 10 in-

duziert. Der Induktionsstrom in den Billets 10 wiederum erzeugt ein weiteres Magnetfeld, welches mit dem von der Wicklung erzeugten Magnetfeld superponiert und eine Spannung in der Wicklung 60 rückinduziert. Um die supraleitende Wicklung 60 mit optimalem Wirkungsgrad zu betreiben, ist die zeitliche Variation des durch die Wicklung 60 fließenden Stromes vorzugsweise Null, d.h. $I_{wi}(t) = 0$. Durch die zeitlich in der Regel nicht konstante rückinduzierte Spannung gilt jedoch $I_{wi}(t) \neq 0$. Die Rückinduktion kann reduziert werden, in dem die Wicklung 60 mit einem Gleichstrom gespeist wird, der die relative Permeabilität vorzugsweise bis kurz vor den Sättigungsbereich senkt. Wenn dann das von dem Induktionsstrom erzeugte Magnetfeld mit dem von der Wicklung 60 erzeugten Magnetfeld additiv superponiert, wird die zusätzliche Feldstärke aufgrund der geringen relativen Permeabilität des Eisenkerns 55.2 nicht oder nur schlecht von dem Eisenkern 55.2 zu der Wicklung 60 geführt, sondern breitet sich im Wesentlichen "ungeführt" aus. Entsprechend kleiner ist die Änderung des magnetischen Flusses durch die Wicklung 60 und somit die rückinduzierte Spannung.

[0028] In einer anderen Ausführungsform kann das Magnetsystem 50 im Wesentlichen aus einem C-förmigen Eisenkern 55.3 mit einer vorzugsweise HTSL-Wicklung 60 bestehen (Fig. 3a und 3b).

[0029] Die Wicklung 60 wird von einer geregelten Gleichstromquelle 80 gespeist. Der Eisenkern führt das so erzeugte Magnetfeld, das durch die schwarzen Pfeile symbolisiert wird (nur Fig. 3b). Anders als bei der Ausführungsform nach Fig. 2 erfolgt der magnetische Rückschluss nicht durch den freien Raum sondern durch den Schenkel 57.3 (Fig. 3b). Zwischen den beiden Schenkeln 56.3, 57.3 des Eisenkerns 55 befindet sich mindestens ein zu erwärmendes Billet 10. Anders als dargestellt, ist das zu erwärmende Billet 10 in der Regel nicht exakt zylindrisch und wird meist auch nicht exakt um seine Zylinderachse gedreht. Entsprechend variiert die vom magnetischen Fluss durchsetzte Fläche des Billets 10 und damit die Rückinduktion, wodurch auch der Strom durch die supraleitende Wicklung variiert. Wie schon zuvor beschrieben, wird die Rückinduktion durch entsprechende Wahl des Wertes des Gleichstroms, mit dem die Wicklung 60 gespeist wird, reduziert. Die Schnittfläche des Eisenkerns 55.3 rechtwinklig zu dem durch die schwarzen Pfeile symbolisierten Magnetfeld ist im Bereich der Wicklung 60 im Vergleich zu den entsprechenden Flächen der Schenkel 56.3, 57.3 reduziert. Zu erkennen ist die verringerte Dicke d_{wi} des Eisenkerns im Bereich der Wicklung im Vergleich zur Dicke d_f der freien Schenkel. Dadurch wird die relative Permeabilität des Eisenkerns im Bereich der Wicklung nochmals reduziert. Alternativ kann der Eisenkern 55.4, wie in Fig. 4a und Fig. 4b gezeigt, auch E-förmig sein. Zwischen den freien Schenkeln 71 und 72 bzw. 72 und 73 ist je eine Tasche, in die ein Billet 10 eingebracht ist. Auf dem mittleren freien Schenkel 72 sitzt eine Spule mit einer HTSL-Wicklung 60, die von einer nur in Fig. 4b dargestellten geregelten

Gleichstromquelle 80 gespeist wird. Im Wesentlichen besteht der Eisenkern 55.4 aus geschichteten Blechen 58, die orthogonal zu der Ebene geschichtet sind, in der der in den Billets 10 induzierte Strom fließt.

5 [0030] Fig. 5 zeigt die berechnete Rückinduktionsspannung U_{ind} in Volt als Funktion des Wicklungsstromes I_{wi} ausgehend von 120 kW Heizleistung durch Drehung eines Billets im Feld einer Wicklung auf einem Eisenkern, die 3000 Windungen hat, bei einer gleichmäßigen Änderung der Drehfrequenz des Billets relativ zur Wicklung innerhalb 1s um 8Hz. Für kleine Ströme (z.B. $I_{wi} \approx 50$ A) hat die Rückinduktionsspannung ihr betragsmäßiges Maximum von etwa 220 V. Mit zunehmendem Strom I_{wi} nimmt die Rückinduktion zunächst betragsmäßig stark ab. Eine Erhöhung des Stroms I_{wi} um beispielsweise etwa 15 A auf $I_{wi} \approx 65$ A verringert die Rückinduktionsspannung U_{ind} betragsmäßig um rund 100 V.

10 [0031] Oberhalb von etwa 80 A bewirkt eine weitere Erhöhung des Stroms nur eine vergleichsweise geringe Verringerung der Rückinduktionsspannung U_{ind} . Beispielsweise bewirkt eine Erhöhung des Stroms I_{wi} von etwa 80 A auf etwa 100 A lediglich eine Verringerung der Rückinduktionsspannung um ca. 20 V. Der optimale Betriebsbereich für den Induktionsheizer liegt zwischen etwa 60 A (- 180.000 Amperewindungen) und etwa 80 A (- 240.000 Amperewindungen) insbesondere bei etwa 70 A (- 210.000 Amperewindungen), denn dann hat die relative Permeabilität des Eisenkerns einen Wert, der nur noch eine vergleichsweise geringe Rückinduktion zulässt, aber gleichzeitig noch ausreicht damit der Eisenkern das von der supraleitenden Wicklung erzeugte Magnetfeld zu dem Billet führt.

35 Patentansprüche

1. Verfahren zum induktiven Erwärmen eines Billets (10) aus einem elektrisch leitenden Werkstoff durch Drehen des Billets (10) relativ zu einem Magnetfeld, das mittels mindestens einer gleichstromgespeisten supraleitenden Wicklung (60) auf einem Eisenkern (55.2, 55.3, 55.4) erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wicklung (60) mit einem Gleichstrom gespeist wird, der einen Wert hat, der in dem Eisenkern (55.2, 55.3, 55.4) zumindest im Bereich der Wicklung (60) eine magnetische Flussdichte erzeugt, bei der die relative Permeabilität des Werkstoffs des Eisenkerns (55.2, 55.3, 55.4) kleiner als im stromlosen Zustand der Wicklung (60) ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mindestens zwei elektrisch leitenden Billets (10) durch Drehen der Billets (10) relativ zu dem Magnetfeld, das von mindestens einer gleichstromgespeisten supraleitenden Wicklung (60) auf einem Eisenkern (55.4) erzeugt wird, erwärmt werden, wobei in jedem Billet (10) ein zeitliche variierender Induktionsstrom erregt wird, der je eine Rückinduktionsspannung in der

- Wicklung (60) hervorruft, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bewegung der Billets (10) relativ zueinander so geregelt wird, dass Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Billets (10) gegensinnig zueinander gedreht werden.
4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Lage der Billets (10) relativ zueinander so geregelt wird, dass die Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren.
5. Verfahren nach Anspruch 2, Anspruch 3 oder Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Billets (10) mit betragsmäßig zumindest etwa gleicher Winkelgeschwindigkeit gedreht werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wert des Gleichstroms durch die Wicklung (60) auf einen im wesentlichen konstanten Wert geregelt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Querschnitt des Eisenkerns (55.2, 55.3, 55.4) im Bereich der Wicklung (60) kleiner als außerhalb der Wicklung (60) gewählt wird.
8. Vorrichtung zum induktiven Erwärmen mindestens eines Billets (10) aus einem elektrisch leitenden Material, mit mindestens einer supraleitenden Wicklung (60) auf einem Eisenkern (55.2, 55.3, 55.4), einer Gleichstromquelle (80) zum Erzeugen eines Gleichstromes in der Wicklung (60) und mindestens einer relativ zur Wicklung (60) drehangetriebenen Einspannvorrichtung für das Billet (10), **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wert des in der Wicklung (60) durch die Gleichstromquelle (80) erzeugten Gleichstroms so eingestellt ist, daß die relative Permeabilität des Eisenkerns (55.2, 55.3, 55.4) zumindest im Bereich der Wicklung (60) gegenüber dem stromlosen Zustand der Wicklung (60) reduziert ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8 zum induktiven Erwärmen mindestens zweier Billets (10) aus einem elektrisch leitenden Material, mit mindestens zwei relativ zur Wicklung (60) drehangetriebenen Einspannvorrichtungen, in die jeweils eines der Billets (10) einspannbar ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einspannvorrichtungen gegensinnig angetrieben sind.
10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9 zum induktiven Erwärmen mindestens zweier Billets (10) aus einem elektrisch leitenden Material, mit mindestens zwei relativ zur Wicklung (60) drehangetriebenen Einspannvorrichtungen, in die jeweils eines der Billets (10) einspannbar ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorrichtung Mittel zum Bestimmen der von zeitlich variierenden Induktionsströmen in den Billets (10) jeweils hervorgerufenen Rückinduktionsspannungen hat, und dass die Vorrichtung eine Steuerung hat, welche die Drehantriebe der Einspannvorrichtungen so ansteuert, daß die jeweils hervorgerufenen Rückinduktionsspannungen subtraktiv superponieren.
11. Vorrichtung nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einspannvorrichtungen mit betragsmäßig zumindest etwa gleicher Winkelgeschwindigkeit angetrieben sind.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Eisenkern (55.3) ein näherungsweise C-förmiges Joch ist.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Eisenkern (55.4) ein näherungsweise E-förmiges Joch mit je einem Luftspalt zur Aufnahme je eines Billets zwischen dem Mittelschenkel und dem jeweiligen Endschenkel ist.
14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Eisenkern (55.4) zumindest teilweise aus geschichteten Blechen (58) besteht.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Eisenkern (55.3) im Bereich der Wicklung (60) einen kleineren Querschnitt als außerhalb der Wicklung (60) hat.

Claims

1. A method for inductive heating of a billet (10) made of an electrically conductive material by rotating the billet (10) relative to a magnetic field which is generated by means of at least one superconducting winding (60) which is supplied with direct current and disposed on an iron core (55.2, 55.3, 55.4), **characterized in that** the winding (60) is supplied with a direct current which has a value which generates a magnetic flux density in the iron core (55.2, 55.3, 55.4) at least in the region of the winding (60) in which the relative permeability of the material of the iron core (55.2, 55.3, 55.4) is lower than in the current-free state of the winding (60).
2. A method according to claim 1, in which at least two electrically conductive billets (10) are heated by rotation of the billets (10) relative to the magnetic field which is generated by at least superconducting wind-

- ing (60) on an iron core (55.4), which winding is supplied with direct current, with a temporally varying induction current being generated in each billet (10) which causes one back-induction voltage each in the winding (60), **characterized in that** the movement of the billets (10) relative to one another is controlled in such a way that back-induction voltages superpose in a subtractive manner.
3. A method according to claim 2, **characterized in that** the billets (10) are rotated in opposite directions with respect to each other.
 4. A method according to claim 2, **characterized in that** the position of the billets (10) relative to one another is controlled in such a way that the back-induction voltages superpose in a subtractive manner.
 5. A method according to claim 2, claim 3 or claim 4, **characterized in that** the billets (10) are rotated with an angular velocity which is approximately the same according to the amount.
 6. A method according to one of the claims 1 to 5, **characterized in that** the value of the direct current is controlled by the winding (60) to a substantially constant value.
 7. A method according to one of the claims 1 to 6, **characterized in that** the cross section of the iron core (55.2, 55.3, 55.4) is chosen smaller in the region of the winding (60) than outside of the winding (60).
 8. An apparatus for the inductive heating of at least one billet (10) made of an electrically conductive material, comprising at least one superconducting winding (60) on an iron core (55.2, 55.3, 55.4), a direct-current source (80) for generating a direct current in the winding (60) and at least one clamping apparatus for the billet (10) which is rotatably driven relative to the winding (60), **characterized in that** the value of the direct current generated in the winding (60) by the direct current source (80) is set in such a way that the relative permeability of the iron core (55.2, 55.3, 55.4) is reduced at least in the region of the winding (60) relative to the current-free state of winding (60).
 9. An apparatus according to claim a for the inductive heating of at least two billets (10) made of an electrically conductive material, comprising at last two clamping apparatuses which are rotatably driven relative to the winding (60), in which one of the billets (10) can be clamped, **characterized in that** the clamping apparatuses are driven in opposite directions.
 10. An apparatus according to claim 8 or 9 for the inductive heating of at least two billets (10) made of an electrically conductive material, comprising at last two clamping apparatuses which are rotatably driven relative to the winding (60), in which one of the billets (10) can be clamped, **characterized in that** the apparatus comprises means for determining the back-induction voltages each caused by temporally varying induction currents in the billets (10), and the apparatus comprises a control device which controls the rotary drives of the clamping apparatuses in such a way that the respectively caused back-induction voltages are superposed in a subtractive manner.
 11. An apparatus according to claim 9 or 10, **characterized in that** the clamping apparatuses are rotated with an angular velocity which is approximately the same according to the amount.
 12. An apparatus according to one of the claims 8 to 11, **characterized in that** the iron core (55.3) is an approximately C-shaped yoke.
 13. An apparatus according to one of the claims 8 to 12, **characterized in that** the iron core (55.4) is an approximately E-shaped yoke with an air gap each for receiving one billet each between the middle leg and the respective end leg.
 14. An apparatus according to one of the claims 8 to 13, **characterized in that** the iron core (55.4) consists at least partly of layered sheets (58).
 15. An apparatus according to one of the claims 8 to 14, **characterized in that** the iron core (55.3) has a smaller cross section in the region of the winding (60) than outside of the winding (60).
- #### 40 Revendications
1. Procédé pour le chauffage par induction d'une billette (10) faite d'un matériau conducteur électrique par rotation de la billette (10) par rapport à un champ magnétique produit au moyen d'au moins un enroulement supraconducteur (60) alimenté en courant continu sur un noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4), **caractérisé en ce que** l'enroulement (60) est alimenté avec un courant continu qui produit dans le noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4), au moins au niveau de l'enroulement (60), une densité de flux magnétique à laquelle la perméabilité relative du matériau du noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4) est plus basse que dans l'état hors tension de l'enroulement (60).
 2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel au moins deux binettes (10) conductrices électriques sont chauffées par rotation des billettes (10) par rap-

- port au champ magnétique produit par au moins un enroulement supraconducteur (60) alimenté en courant continu sur un noyau en fer (55.4), dans lequel un courant d'induction variant dans le temps est créé dans chaque billette (10) et produit pour chacune une tension d'induction en retour dans l'enroulement (60), **caractérisé en ce que** le mouvement des billettes (10) l'une par rapport à l'autre est régulé de telle façon que les tensions d'induction en retour se superposent de façon soustractive.
3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** les billettes (10) sont tournées en sens inverse l'une de l'autre.
 4. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** la position des billettes (10) l'une par rapport à l'autre est routée de telle façon que les tensions d'induction en retour se superposent de façon soustractive.
 5. Procédé selon la revendication 2, la revendication 3 ou la revendication 4, **caractérisé en ce que** les billettes (10) sont tournées à une vitesse angulaire de grandeur au moins approximativement égale.
 6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** la valeur du courant continu traversant l'enroulement (60) est réglée à une valeur sensiblement constante.
 7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** la section du noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4) est choisie plus petite au niveau de l'enroulement (60) qu'à l'extérieur de l'enroulement (60).
 8. Dispositif pour le chauffage par induction d'au moins une billette (10) faite d'un matériau conducteur électrique, avec au moins un enroulement supraconducteur (60) sur un noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4), une source de courant continu (80) destinée à produire un courant continu dans l'enroulement (60) et au moins un dispositif de serrage de la billette (10) entraîné en rotation par rapport à l'enroulement (60), **caractérisé en ce que** la valeur du courant continu produit dans l'enroulement (60) par la source de courant continu (80) est réglée de telle façon que la perméabilité relative du noyau en fer (55.2, 55.3, 55.4) soit réduite au moins au niveau de l'enroulement (60) par rapport à l'état hors tension de l'enroulement (60).
 9. Dispositif selon la revendication 8 pour le chauffage par induction d'au moins deux billettes (10) faites d'un matériau conducteur électrique, avec au moins deux dispositifs de serrage entraînés en rotation par rapport à l'enroulement (60) dans chacun desquels une des billettes (10) peut être serrée, **caractérisé en ce que** les dispositifs de serrage sont entraînés dans des sens opposés
 10. Dispositif selon la revendication 8 ou 9 pour le chauffage par induction d'au moins deux billettes (10) faites d'un matériau conducteur électrique, avec au moins deux dispositifs de serrage entraînés en rotation par rapport à l'enroulement (60) dans chacun desquels une des billettes (10) peut être serrée, **caractérisé en ce que** le dispositif présente des moyens pour déterminer les tensions d'induction en retour produites dans chacune des billettes (10) par les courants d'induction variant dans le temps, et **en ce que** le dispositif possède une commande qui active les entraînements rotatifs des dispositifs de serrage de telle façon que les tensions d'induction en retour produites se superposent de façon soustractive.
 11. Dispositif selon la revendication 9 ou 10, **caractérisé en ce que** les dispositifs de serrage sont entraînés à une vitesse angulaire de grandeur au moins approximativement égale.
 12. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 11, **caractérisé en ce que** le noyau en fer (55.3) est une culasse approximativement en forme de C.
 13. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 12, **caractérisé en ce que** le noyau en fer (55.4) est une culasse approximativement en forme de E avec un entrefer pour recevoir une billette entre le bras central et chacun des bras d'extrémité.
 14. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 13, **caractérisé en ce que** le noyau en fer (55.4) se compose au moins partiellement de tôles enduites (58).
 15. Dispositif selon l'une des revendications 8 à 14, **caractérisé en ce que** le noyau en fer (55.3) a une plus petite section au niveau de l'enroulement (60) qu'à l'extérieur de l'enroulement (60).

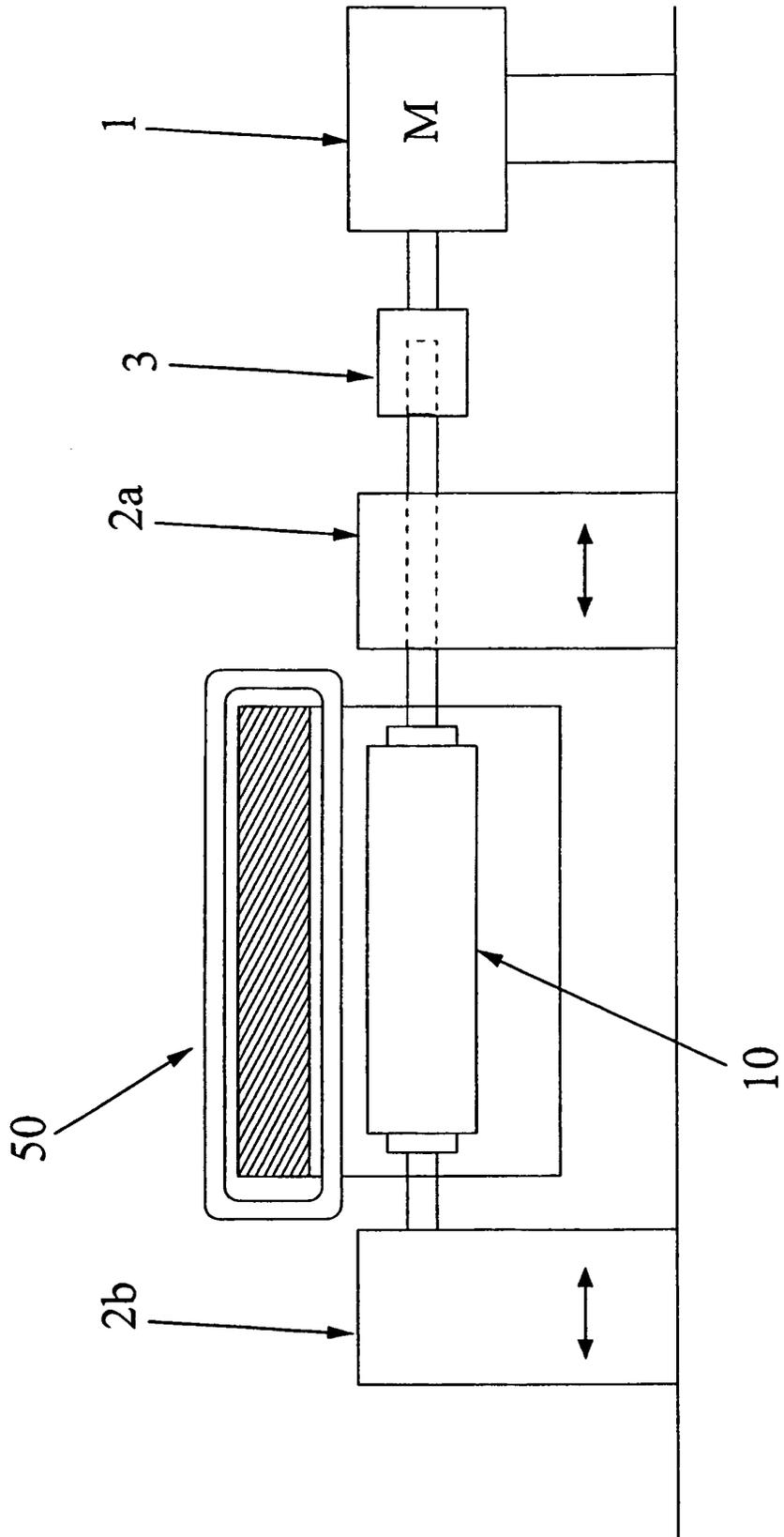


Fig. 1

Fig. 2a

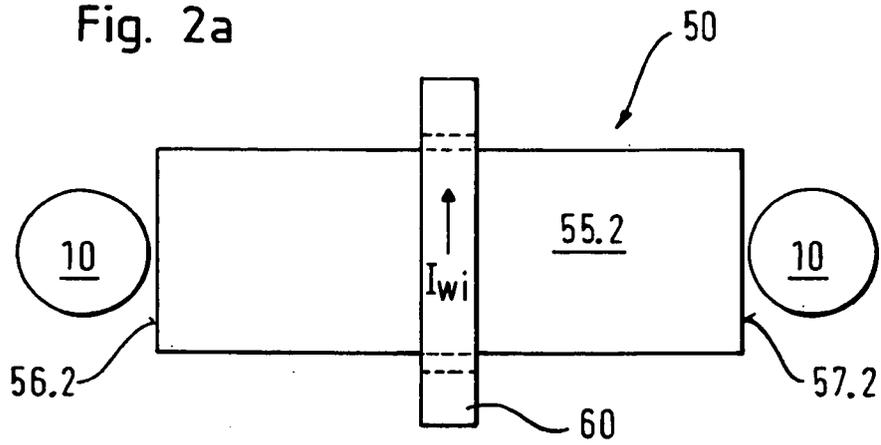


Fig. 2b

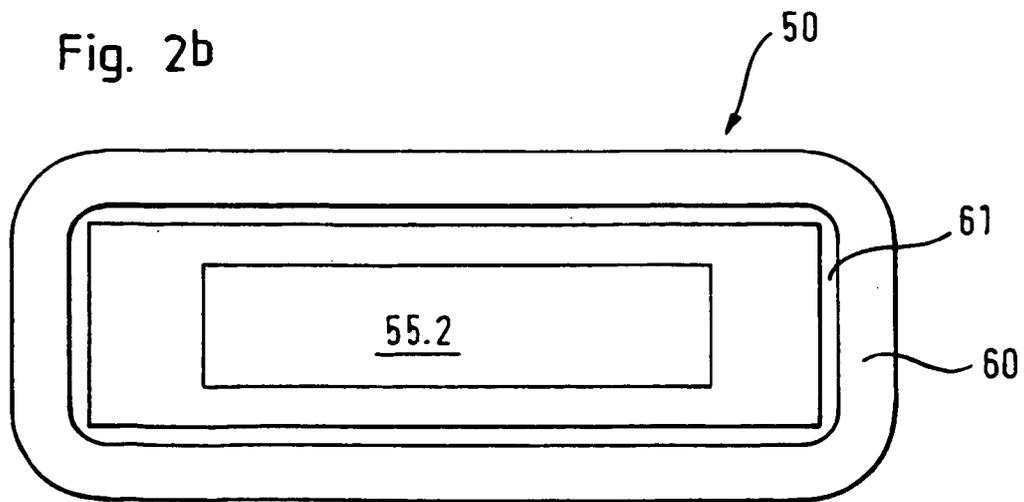


Fig. 3a

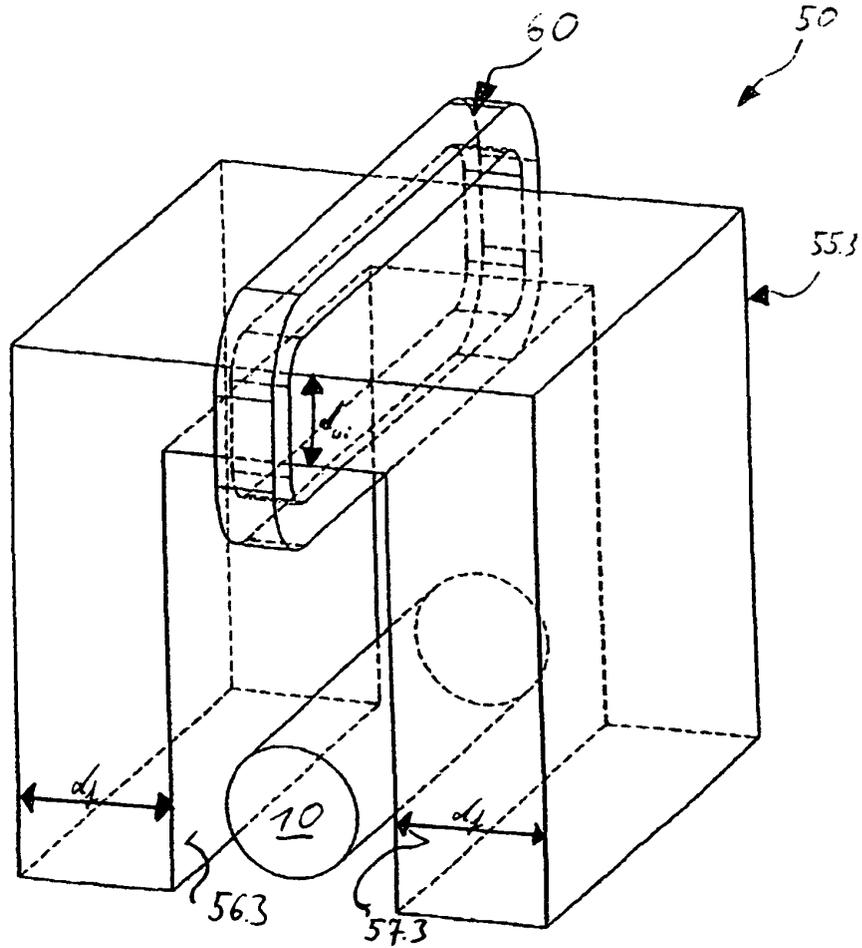


Fig. 3b

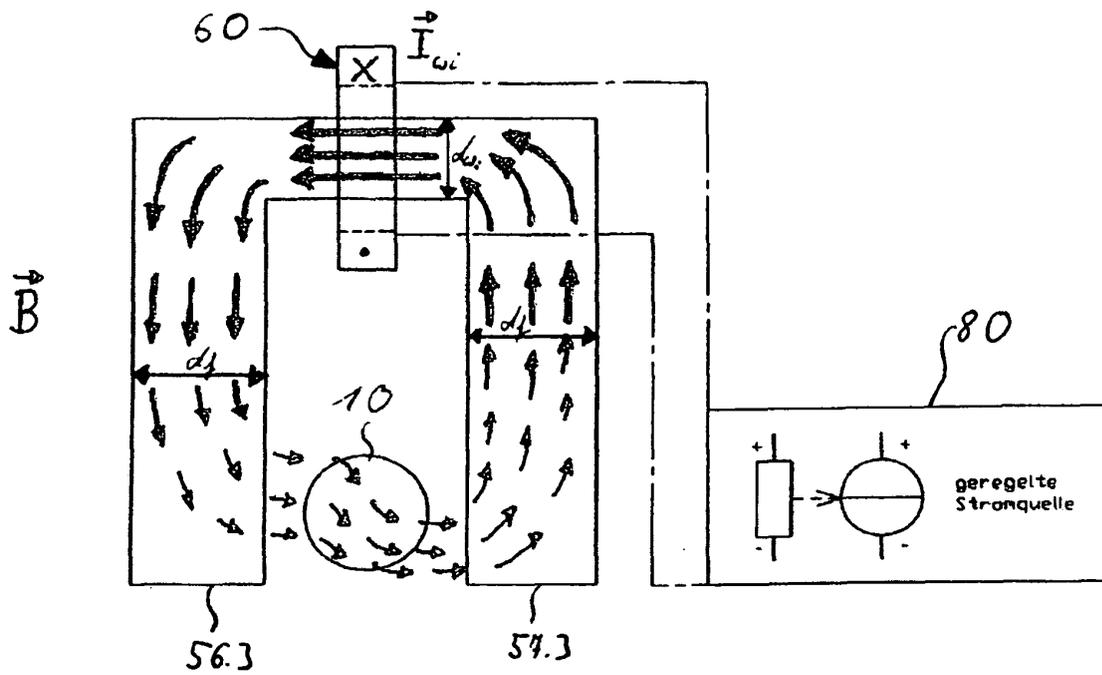


Fig. 4a

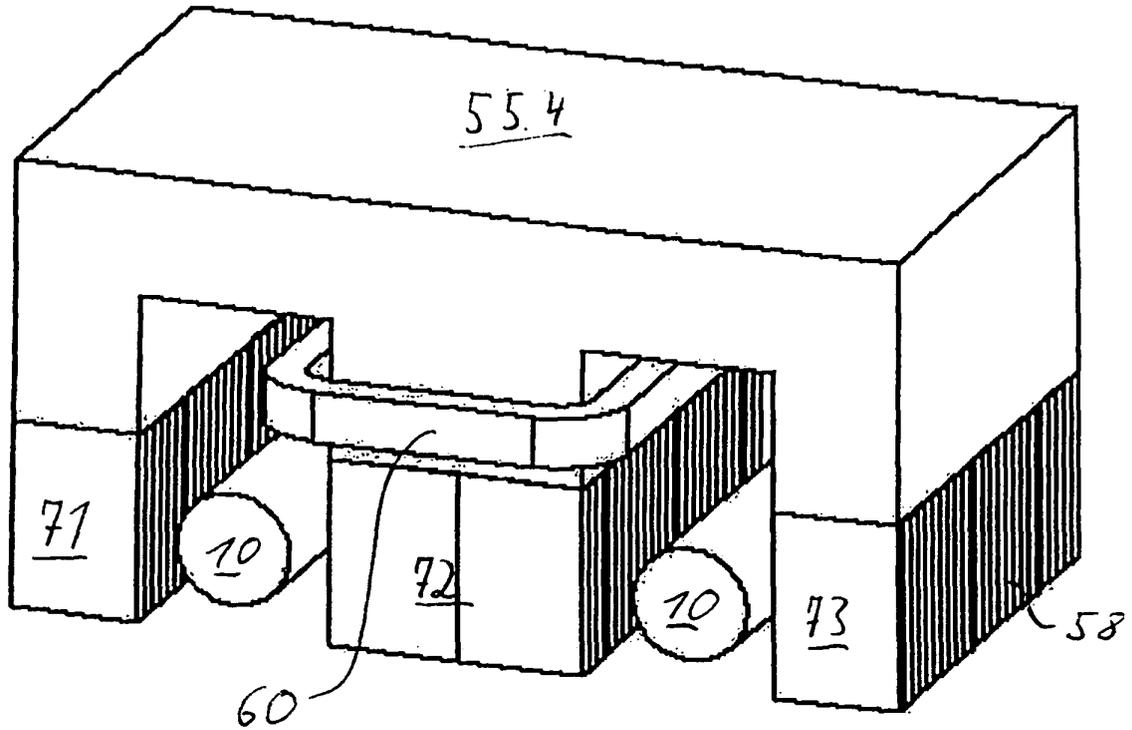


Fig. 4b

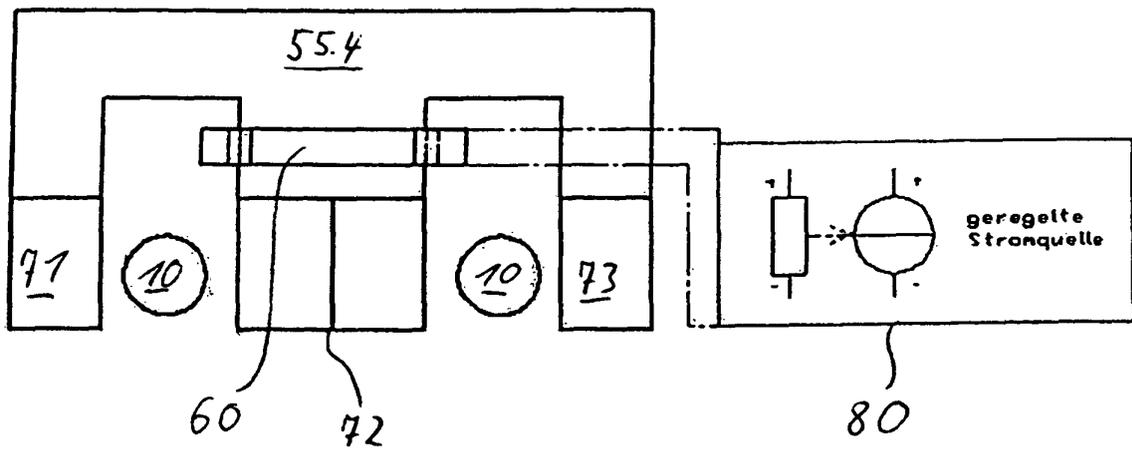
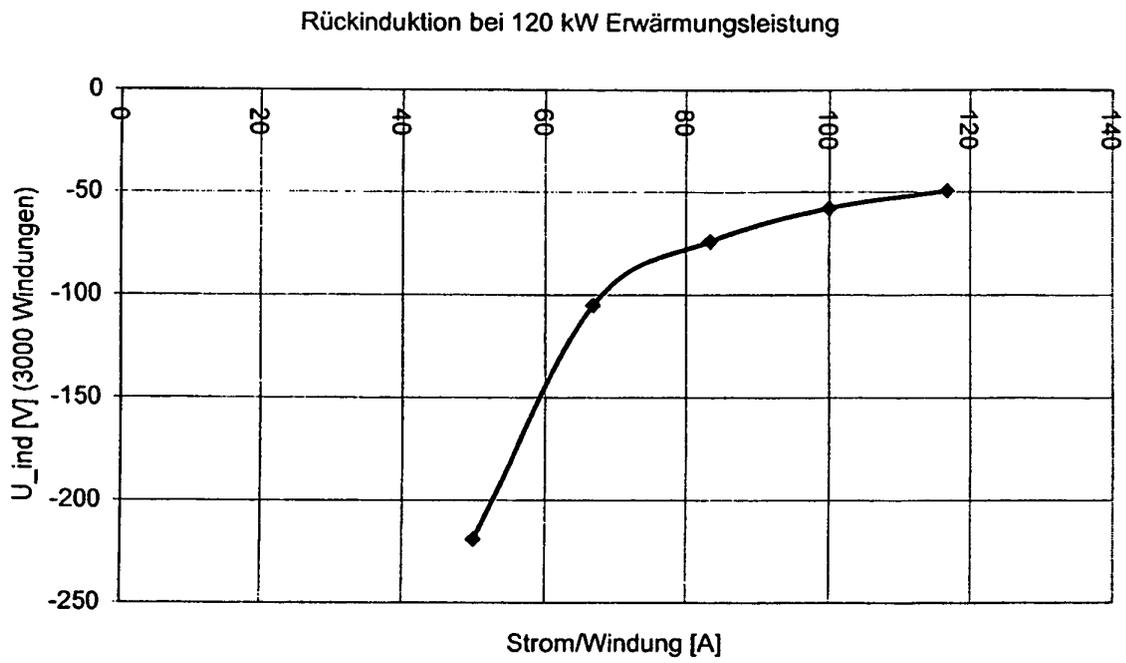


Fig. 5



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102005061670 [0002]
- US 3842243 A [0006]