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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
5. März 2009 (05.03.2009)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2009/027305 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
E21B 43/24 (2006.01) *H05B 6/02* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2008/060927

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. August 2008 (21.08.2008)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2007 040 605.5 27. August 2007 (27.08.2007) DE
10 2008 022 176.7 5. Mai 2008 (05.05.2008) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **DIEHL, Dirk** [DE/DE]; Berliner Platz 3, 91052 Erlangen (DE). **HUBER, Norbert** [DE/DE]; Schwabenstrasse 22, 91052 Erlangen (DE). **WACKER, Bernd** [DE/DE]; Haundorferstr. 2 A, 91074 Herzogenaurach (DE). **WEIGEL, Jan** [DE/DE]; Pfarrer-Merkel-Weg 5, 91077 Grossenbuch (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

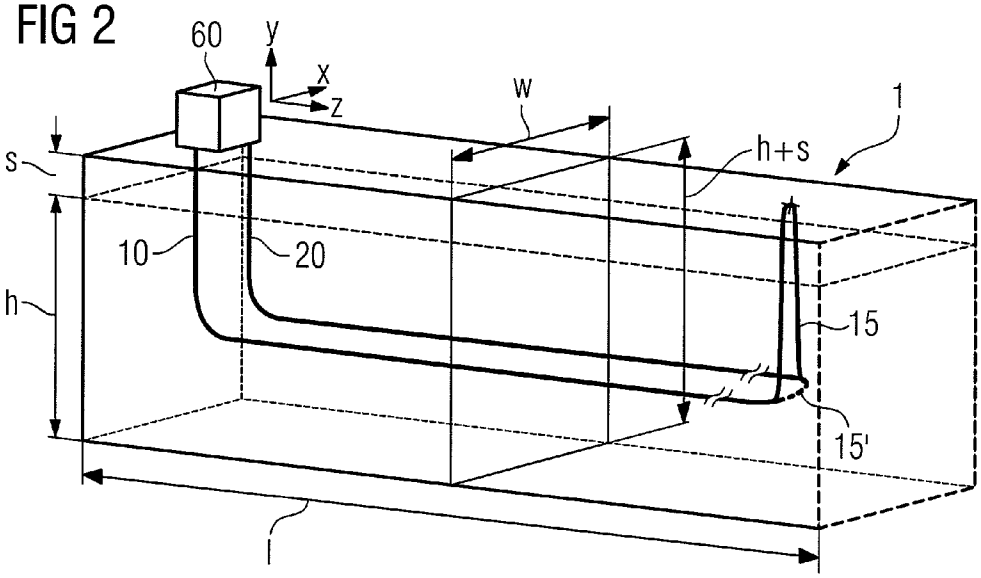
(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: APPARATUS FOR IN SITU EXTRACTION OF BITUMEN OR VERY HEAVY OIL

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG ZUR "IN SITU"-FÖRDERUNG VON BITUMEN ODER SCHWERSTÖL

FIG 2



(57) Abstract: In order to lower the viscosity of bitumen or very heavy oil in deposits, thermal energy is applied to the deposit, especially inductive and/or resistive heat being optionally applied in addition to vapor that is applied according to the steam assisted gravity drainage (SAGD) process. According to the invention, a high-frequency generator feeds electric power to a linearly extended conductor loop (10, 15, 20) at a predefined depth of the deposit, the inductance of the conductor loop (10, 15, 20) being compensated in some sections or continuously. Advantageously, one of the conductors (10, 15) of the conductor loop (10, 15, 20) can be disposed substantially in a vertical direction above the extraction pipe (102). Models have shown that an extraction system can be exclusively operated by means of a device for inductive heating (electromagnetic gravity drainage (EMGD) process).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/027305 A2

GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(57) Zusammenfassung: Zur Viskositätserniedrigung von Bitumen oder Schwerstöl in Lagerstätten wird die Lagerstätte mit Wärmenergie beaufschlagt, wobei neben einer Dampfbeaufschlagung nach dem so genannten SAGD-Verfahren insbesondere eine induktive und/oder resistive Heizung vorgesehen sein kann. Erfindungsgemäß wird eine linear ausgedehnte Leiterschleife (10, 15, 20) in vorgegebener Tiefe der Lagerstätte und von einem Hochfrequenzerzeuger mit elektrischer Leistung gespeist, wobei ein Induktivitätsbelag der Leiterschleife (10, 15, 20) jeweils abschnittsweise oder kontinuierlich kompensiert wird. Vorteilhafterweise kann einer der Leiter (10, 15) der Leiterschleife (10, 15, 20) im Wesentlichen senkrecht über dem Förderrohr (102) angeordnet sein. Modellierungen haben gezeigt, das eine Förderanlage ausschließlich mit einer Vorrichtung zur induktiven Beheizung betrieben werden kann (sog. EMGD-Verfahren).

Beschreibung

Vorrichtung zur „in situ"-Förderung von Bitumen oder Schwerstöl

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur „in situ"-Förderung von Bitumen oder Schwerstöl aus Ölsand-Lagerstätten als Reservoir, wobei das Reservoir mit Wärmeenergie zur Viskositätserniedrigung des im Ölsand vorhandenen Bitumens oder Schwerstöl beaufschlagt wird, wozu eine elektrische/elektromagnetische Heizung vorgesehen ist.

Oberflächennahe Ölsand-Lagerstätten können gegebenenfalls im Tagebau abgebaut werden, wobei anschließend eine Aufbereitung zur Separation des Öls erfolgen muss. Es sind aber auch „in situ"-Verfahren bekannt, bei dem durch Einbringen von Lösungs- bzw. Verdünnungsmitteln und/oder zum anderen durch Aufheizen bzw. Aufschmelzen des Schwerstöls oder Bitumens bereits im Reservoir fließfähig gemacht wird. Die „in situ"-Verfahren sind insbesondere für nicht oberflächennahe Reservoire geeignet.

Das am weitesten verbreitete und angewendete „in situ"-Verfahren zur Förderung von Bitumen ist das SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)-Verfahren. Dabei wird Wasserdampf, der dem Lösungsmittel zugesetzt sein kann, unter hohem Druck durch ein innerhalb des Reservoirs horizontal verlaufendes Rohr eingepresst. Das aufgeheizte, geschmolzene und vom Sand oder Gestein abgelöste Bitumen sickert zu einem zweiten etwa 5 m (Abstand von Injektor - und Produktionsrohr abhängig von Reservoirgeometrie) tiefer gelegenen Rohr, durch das die Förderung des verflüssigten Bitumens erfolgt. Der Wasserdampf hat dabei mehrere Aufgaben gleichzeitig zu erfüllen, nämlich die Einbringung der Heizenergie zur Verflüssigung, das Ablösen vom Sand sowie den Druckaufbau im Reservoir, um einerseits das Reservoir geomechanisch für einen Bitumentransport durchlässig zu machen (Permeabilität) und andererseits die Förderung des Bitumens ohne zusätzliche Pumpen zu ermöglichen.

Das SAGD-Verfahren startet, indem typischerweise 3 Monate beide Rohre durch Dampf aufgeheizt werden, um zunächst möglichst schnell das Bitumen im Raum zwischen den Rohren zu verflüssigen. Danach erfolgt die Dampfeinbringung in das Reservoir durch das obere Rohr und die Förderung durch das untere Rohr kann beginnen.

Aus der US 2006/0151166 A1 ist ein Verfahren für die resistive Beheizung einer Schweröllagerstätte bekannt, bei dem zur Verringerung der Viskosität des Schweröls ein Werkzeug mit Elektroden für eine dreiphasige resistive Beheizung der Lagerstätte vorgesehen ist. Mit den älteren, nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldungen AZ 10 2007 008 292.6 mit der Bezeichnung „Vorrichtung und Verfahren zur in situ-Gewinnung einer kohlenwasserstoffhaltigen Substanz unter Herabsetzung deren Viskosität aus einer unterirdischen Lagerstätte" und AZ 10 2007 036 832.3 mit der Bezeichnung „Vorrichtung zur in situ-Gewinnung einer kohlenwasserstoffhaltigen Substanz" der Anmelderin werden bereits elektrische/elektromagnetische Heizverfahren für eine „in situ"-Förderung von Bitumen und/oder Schwerstöl vorgeschlagen, bei denen insbesondere eine induktive Beheizung des Reservoirs erfolgt.

Ausgehend vom Stand der Technik ist es Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung mit geeigneter Konzeption zur elektrisch/elektromagnetischen Heizung des Reservoirs einer Ölsand-Lagerstätte zu schaffen.

Die Aufgabe ist erfindungsgemäß durch die Merkmale des Patentanspruches 1 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Gegenstand der Erfindung ist die bergbauliche Anwendung eines resonant abgestimmten Schwingkreises zur induktiven Erwärmung einer als Reservoir bezeichneten Ölsand-Lagerstätte unter Tage in einer Tiefe von bis zu mehreren 100 Metern in einem „in situ"-Ölproduktionsprozess. Die erfindungsgemäße Vorrichtung

enthält dazu einen an sich bekannten externen Wechselstromgenerator für elektrische Leistung, der zur Bestromung einer Leiterschleife dient. Die Leiterschleife wird gebildet aus zwei oder mehr Leitern, die innerhalb oder außerhalb des Reservoirs elektrisch leitend verbunden sind. Die Induktivität der Leiterschleife ist abschnittsweise kompensiert. Damit ist eine unerwünschte Blindleistung vermieden. Die wechselbestromte Leiterscheife erzeugt ein Wechselmagnetfeld im Reservoir, durch das Wirbelströme im Reservoir angeworfen werden, die zur Aufheizung desselben führen.

Bei der Erfindung sind zwei induktive Effekte zu unterscheiden:

- Die Gesamtinduktivität der Leiterschleife, die hauptsächlich durch die unerwünschte Selbstinduktivität der Leiterschleife gebildet wird und kompensiert werden muss, um hohen Spannungsabfall entlang der Leitungen zu verhindern und dem Generator keine Blindleistung abzufordern.
- Die erwünsche Gegeninduktivität zum Reservoir, die den Stromfluss und damit das Heizen des Reservoirs ermöglicht

Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist das Aufheizen von unkonventionellem schwerem Öl mit Viskositäten von z. B. 5°API bis 15°API von Temperaturen von 10°C Umgebungstemperatur auf bis zu 280°C möglich. Dadurch kann das Öl in einem durch die Verbesserung der Fluidität gravitativen Prozess zur unteren nichtpermeablen Grenzschicht des Reservoirs fließen und von dort mittels bekannter Drainage-Produktionsrohre abfließen, um entweder mittels Anhebepumpen an die Erdoberfläche gepumpt oder durch den im Reservoir durch Beheizung und/oder Dampfeinbringung aufgebauten Druck schwerkraftüberwindend an die Oberfläche gefördert zu werden.

Bei der Erfindung kann der elektromagnetische Heizprozess mit einem Dampfprozess kombiniert sein, welcher für eine verbesserte Permeabilität und/oder Leitfähigkeit z. B. durch eine zusätzliche elektrolytische Anreicherung eingespeist wird. Es ist auch möglich, die Dampfstimulation durch das Produktionsrohr zu Beginn der Aufheizphase oder später zyklisch erfolgen zu lassen.

In spezifischer Weiterbildung kann ein rein elektromagnetisch-induktives Verfahren zur Erwärmung und Förderung von Bitumen mit besonders günstigen Anordnungen der Induktoren vorgesehen werden. Wesentlich ist dabei, einen der Induktoren direkt über dem Produktionsrohr, also ohne nennenswerten horizontalen Versatz, zu platzieren. Zwar lässt sich ein Versatz bei der Einbringung der Bohrlöcher nicht völlig vermeiden. Der Versatz sollte in jedem Fall kleiner als 10 m sein, vorzugsweise kleiner als 5 m, was bei den entsprechenden Dimensionen der Lagerstätte als vernachlässigbar angesehen wird.

Dabei geht es um die Positionierung der Induktoren, die gerade für ein Förderverfahren ohne Dampf entscheidend sind, sowie um die elektrische Verschaltung der Teilleiter.

Sofern bei der Erfindung ausschließlich auf die elektromagnetische Beheizung abgestellt ist, wird auch vom EMGD(Electro-Magnetic Drainage Gravity)-Verfahren gesprochen. Beim EMGD-Verfahren geht es um die Positionierung der Induktoren mit einzelnen Teilleitern, die gerade für ein Förderverfahren ohne Dampf entscheidend sind, sowie um die elektrische Verschaltung der Teilleiter.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Figurenbeschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung in Verbindung mit den Patentansprüchen.

Es zeigen jeweils in schematischer Darstellung:

Figur 1 einen Schnitt durch ein Ölsand-Reservoir mit Injektions- und Förderrohr,

Figur 2 einen perspektivischen Ausschnitt aus einem Ölsand-Reservoir mit einer horizontal im Reservoir verlaufenden elektrischen Leiterschleife,

Figur 3 eine Verdeutlichung der elektrischen Kompensation von Leitungslängsinduktivitäten durch Serienkapazitäten,

Figur 4 einen Schnitt durch einen Leiter mit rohrförmigen Elektroden der integrierten Kondensatoren,

Figur 5 einen Leiter mit ineinander verschachtelten rohrförmigen Elektroden der integrierten Kondensatoren,

Figur 6 einen rohrförmigen Leiter mit integrierten Kondensatoren und einer Vorrichtung zur Elektrolyteinbringung,

Figur 7a und 7b das elektrische Prinzip der Vorrichtungen gemäß Figur 4 und Figur 5 als konventionelle Koaxialanordnung,

Figur 8 eine erste schaltungstechnische Ausführung eines Leistungsgenerators für einen induktiven Heizkreis, der für eine Anwendung bei Figur 1/2 geeignet ist,

Figur 9 eine zweite schaltungstechnische Ausführung eines Leistungsgenerators für einen induktiven Heizkreis mit Parallelschaltung von Wechselrichtern,

Figur 10 eine dritte schaltungstechnische Ausführung eines Leistungsgenerators für einen induktiven Heizkreis mit Reihenschaltung von getakteten Wechselrichtern.

Figur 11 durch Kombination von Figur 1 mit Figur 2 den Stand der Technik des SAGD Verfahrens mit elektromagnetisch-induktiver Unterstützung,

Figur 12 die elektrische Verschaltung der induktiven Teilleiter bei zwei Teilleitern,

Figur 13 die elektrische Verschaltung der induktiven Teilleiter bei drei Teilleitern mit Parallelschaltung zweier Teilleiter,

Figur 14 die elektrische Verschaltung der induktiven Teillei-

ter bei drei Teilleitern mit Drehstrom sowie
Figur 15 bis 16 vier Varianten des neuen EMGD-Verfahrens mit unterschiedlicher Anordnung der Induktoren.

Gleiche oder gleich wirkende Einheiten sind in den Figuren mit gleichen oder sich entsprechenden Bezugzeichen versehen. Die Figuren werden nachfolgend jeweils gruppenweise zusammen beschrieben.

In den Figuren 1 und 2 ist eine als Reservoir bezeichnete Ölsand-Lagerstätte 100 dargestellt, wobei für die weiteren Betrachtungen immer eine quaderförmige Einheit 1 mit der Länge l, der Breite w und der Höhe h herausgegriffen wird. Die Länge l kann beispielsweise bis zu einigen 500 m, die Breite w 60 bis 100 m und die Höhe h etwa 20 bis 100 m betragen. Zu berücksichtigen ist, dass ausgehend von der Erdoberfläche E ein „Deckgebirge" der Stärke s bis zu 500 m vorhanden sein kann.

Bei Realisierung des SAGD-Verfahrens ist gemäß Figur 1 in bekannter Weise in dem Ölsand-Reservoir 100 der Lagerstätte ein Injektionsrohr 101 für Dampf- oder Wasser/Dampf-Gemisch und ein Förderrohr 102 für das verflüssigte Bitumen oder Öl vorhanden.

In Figur 2 ist eine Anordnung zur induktiven Heizung dargestellt. Diese kann durch eine lange, d.h. einige 100 m bis 1,5 km, im Boden verlegte Leiterschleife 10 bis 20 gebildet werden, wobei Induktorleitungen 10 und 20 nebeneinanderin vorgegebenem Abstand geführt und am Ende über ein Element 15 oder 15' miteinander als Leiterschleife verbunden sind. Das Element 15 ist insbesondere außerhalb und das Element 15' alternativ innerhalb des Reservoirs 100 angeordnet. Am Anfang werden die Leiter 10 und 20 vertikal oder in einem flachen Winkel durch das Deckgebirge hind bis zum Reservoir 100 führt und von einem HF-Generator 60, der in einem externen Gehäuse untergebracht sein kann, mit elektrischer Leistung versorgt. Insbesondere verlaufen die Leiter 10 und 20 in gleicher Tiefe

nebeneinander, gegebenenfalls aber auch übereinander. Es ist ein seitlicher Versatz der Leiter 10 und 20 vorhanden.

Typische Abstände zwischen den Hin- und Rückleitern 10, 20 sind 5 bis 60 m bei einem Außendurchmesser der Leiter von 10 bis 50 cm (0,1 bis 0,5 m).

Eine elektrische Doppelleitung 10, 20 in Figur 2 mit den vorstehend genannten typischen Abmessungen weist einen Längsinduktivitätsbelag von 1,0 bis 2,7 µH/m auf. Der Querkapazitätsbelag liegt bei den genannten Abmessungen bei nur 10 bis 100 pF/m, so dass die kapazitiven Querströme zunächst vernachlässigt werden können. Dabei sind Welleneffekte zu vermeiden. Die Wellengeschwindigkeit ist durch den Kapazitäts- und Induktivitätsbelag der Leiteranordnung gegeben. Die charakteristische Frequenz der Anordnung ist bedingt durch die Schleifenlänge und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Anordnung der Doppelleitung 10, 20. Die Schleifenlänge ist daher so kurz zu wählen, dass sich hier keine störenden Welleneffekte ergeben.

Es lässt sich zeigen, dass die simulierte Verlustleistungsdichteverteilung in einer Ebene senkrecht zu den Leitern - wie sie sich bei gegenphasiger Bestromung des oberen und unteren Leiters ausbildet - radial abnimmt.

Für eine induktiv eingebrachte Heizleistung von 1 kW pro Meter Doppelleitung wird bei 50 kHz eine Stromamplitude von etwa 350 A für niederohmige Reservoirs mit spezifischen Widerständen von 30 Ω·m und etwa 950 A für hochohmige Reservoirs mit spezifischen Widerständen von 500 Ω·m benötigt. Die erforderliche Stromamplitude für 1 kW/m fällt quadratisch mit der Anregungsfrequenz. d.h. bei 100 kHz fallen die Stromamplituden auf 1/4 der obigen Werte.

Bei einer mittleren Stromamplitude von 500 A bei 50 kHz und einem typischen Induktivitätsbelag von 2 µH/m beträgt der induktive Spannungsabfall etwa 300 V/m.

Mit den oben genannten Gesamtlängen der Doppelleiter 10, 20 würde sich der gesamte induktive Spannungsabfall auf Werte > 100 kV aufsummieren. Solche hohe Spannungen müssen aus folgenden Gründen vermieden werden:

- Ein steuernder Stromrichter ist durch die Scheinleistung charakterisiert, d.h. die Sperrspannung und Stromtragfähigkeit, so dass die Verringerung des Blindleistungsbedarfs unverzichtbar ist.
- Die Elektroden müssten gegen das Reservoir 100 hochspannungsfest isoliert werden, um einen resistiven Stromfluss zu unterbinden, was große Isolationsschichtdicken erfordern und die Elektroden und deren Einbringung in das Reservoir verteuern würde.
- Isolationsprobleme bzw. Überschlagsgefahren insbesondere an den Stromeinleitungspunkten.

Daher ist vorgesehen, die Leitungsinduktivität L abschnittsweise durch diskret oder kontinuierlich ausgeführte Serienkapazitäten C zu kompensieren, was in Figur 3 schematisch dargestellt ist. Diese Art der Kompensation ist zwar vom Stand der Technik bei Systemen der induktiven Energieübertragung auf translatorisch bewegte Systeme bekannt. Im vorliegenden Zusammenhang ergeben sich dadurch besondere Vorteile.

Eigenart bei einer in die Leitung integrierten Kompensation ist, dass die Frequenz des HF-Leitungsgenerators auf die Resonanzfrequenz der Stromschleife abgestimmt werden muss. Dies bedeutet, dass die Doppelleitung 10, 20 für Heizzwecke zweckmäßig, d.h. mit hohen Stromamplituden, nur bei dieser Frequenz betrieben werden kann.

Der entscheidende Vorteil bei letzterer Vorgehensweise besteht darin, dass eine Addition der induktiven Spannungen entlang der Leitung verhindert wird. Werden beim oben genannten Beispiel - d.h. 500 A, 2 µH/m, 50 kHz und 300 V/m -

beispielsweise alle 10 m je ein Kondensator C_i in Hin- und Rückleiter von 1 µF Kapazität eingebracht, kann der Betrieb dieser Anordnung bei 50 kHz resonant erfolgen. Damit sind die auftretenden induktiven und entsprechend kapazitiven Summenspannungen auf 3 kV begrenzt.

Wird der Abstand zwischen benachbarten Kondensatoren C_i verringert, müssen die Kapazitätswerte umgekehrt proportional zum Abstand steigen - bei proportional zum Abstand verringerter Anforderung an die Spannungsfestigkeit der Kondensatoren -, um dieselbe Resonanzfrequenz zu erhalten.

In Figur 4 ist eine vorteilhafte Ausführungsform von in die Leitung integrierten Kondensatoren mit jeweiliger Kapazität C gezeigt. Die Kapazität wird von Zylinderkondensatoren C_i zwischen einer rohrförmigen Außenelektrode 32 eines Abschnitts I und einer rohrförmigen Innenelektrode 34 des Abschnitts II gebildet, zwischen denen sich ein Dielektrikum 33 befindet. Ganz entsprechend wird der benachbarte Kondensator zwischen den Abschnitten II und III gebildet.

Für das Dielektrikum des Kondensators C sind neben einer hohen Spannungsfestigkeit weiterhin eine hohe Temperaturbeständigkeit zu fordern, da sich der Leiter im induktiv geheizten Reservoir 100, das eine Temperatur von z. B. 250°C erreichen kann, befindet und die resistiven Verluste in den Leitern 10, 20 zu einer weiteren Aufheizung der Elektroden führen können. Die Anforderungen an das Dielektrikum 33 werden von einer Vielzahl von Kondensatorkeramiken erfüllt.

Beispielsweise weisen die Gruppe der Aluminiumsilicate, d.h. Porzellane, Temperaturbeständigkeiten von mehreren 100°C und elektrische Durchschlagsfestigkeiten von > 20 kV/mm bei Permittivitätszahlen von 6 auf. Damit können obige Zylinderkondensatoren mit der erforderlichen Kapazität realisiert werden und eine Baulänge von beispielsweise 1 bis 2 m haben.

Wenn die Baulänge kürzer ausfallen soll, ist eine Ineinanderschachtelung mehrerer koaxialer Elektroden entsprechend dem in den Figuren 5 und 7b verdeutlichten Prinzip vorzusehen. Auch andere übliche Kondensatorbauformen können in die Leitung integriert werden, solange diese die erforderliche Spannungs- und Temperaturbeständigkeit aufweisen.

In der Figur 4 ist die gesamte Elektrode bereits von einer Isolation umgeben. Die Isolierung gegen das umliegende Erdreich ist notwendig, um resistive Ströme durch das Erdreich zwischen den benachbarten Abschnitten insbesondere im Bereich der Kondensatoren zu verhindern. Die Isolation verhindert weiterhin den resistiven Stromfluss zwischen Hin- und Rückleiter. Die Anforderungen bzgl. der Spannungsfestigkeit an die Isolation sind jedoch gegenüber der unkompensierten Leitung von > 100 kV auf im obigen Beispiel etwas über 3 kV gesunken und damit durch eine Vielzahl von Isolierstoffen zu erfüllen. Die Isolation muss wie bereits das Dielektrikum der Kondensatoren höheren Temperaturen dauerhaft standhalten, womit sich wiederum keramische Isolierstoffe anbieten. Dabei darf die Isolationsschichtdicke nicht zu gering gewählt werden, da sonst kapazitive Leckströme ins umliegende Erdreich abfließen könnten. Isolierstoffdicken größer z. B. 2 mm sind bei obigem Ausführungsbeispiel ausreichend.

Im Einzelnen ist in Figur 5 gezeigt, dass mehrere rohrförmige Elektroden parallel geschaltet sind. Vorteilhafterweise kann die Parallelschaltung der Kondensatoren zur Erhöhung der Kapazität oder zur Erhöhung ihrer Spannungsfestigkeit genutzt werden. Das elektrische Prinzip dazu ist in Figur 7b dargestellt.

Bei einer Anordnung gemäß Figur 4 kann abschnittsweise eine Elektrolyteinbringung zur gezielten Steigerung der Heizwirkung erfolgen: In der Figur 6 ist die kompensierte Elektrode um ein isoliertes Innenrohr 40 mit isolierten Austrittsöffnungen 41, 42 und 43 erweitert. Damit kann beispielsweise Wasser oder eine elektrisch leitfähige wässrige Salzlösung oder andere Elektrolyte in das Reservoir eingebracht werden, um die Leitfähigkeit des Reservoirs zu erhöhen.

Weiterhin kann das eingebrachte Wasser zur Kühlung des Leiters dienen. Werden die Austrittsöffnungen durch Ventile ersetzt, kann die Leitfähigkeitsänderung zeitlich und räumlich abschnittsweise gezielt erfolgen.

Die Erhöhung der Leitfähigkeit dient der Steigerung der induktiven Heizwirkung, ohne die Stromamplitude in den Leitern erhöhen zu müssen.

Bei den Figuren 4 bis 5 erfolgt also eine Kompensation der Längsinduktivität mittels vorwiegend konzentrierter Querkapazitäten: Anstelle mehr oder weniger kurzer Kondensatoren als konzentrierte Elemente in die Leitung einzubringen, kann auch der Kapazitätsbelag den eine Zweidrahtleitung wie z. B. eine Koaxialleitung oder Mehrdrahtleitungen ohnehin über ihre gesamt Länge bereitstellen zur Kompensation der Längsinduktivitäten verwendet werden. Dazu wird in gleichen Abständen abwechselnd der Innen- und Außenleiter unterbrochen und so der Stromfluss über die verteilten Querkapazitäten erzwungen. Ein solches Vorgehen ist in der DE 10 2004 009 896 A1 beschrieben. In diesem zum Stand der Technik gehörenden Dokument wird im Einzelnen erläutert, wie die Resonanzfrequenz durch die Abstände zwischen den Leitungsunterbrechungen eingestellt werden kann.

Letztere Konzepte, die anhand von Figur 7a und Figur 7b verdeutlicht sind, können auch hier vorteilhaft für die Leiter zur induktiven Reservoirheizung eingesetzt werden, wenn die Leitungen - wie bereits oben beschrieben - mit einer zusätzlichen Außenisolation versehen werden, um resistive Querströme ins umliegende Erdreich zu unterbinden. Im Einzelnen bedeuten dabei 51 bis 53 die Elektroden, C_i die über die Elektroden verteilten Kapazitäten und 54 eine jeweilige Unterbrechung der Leiter. Der Vorteil der verteilten Kapazitäten liegt in einer verringerten Anforderung an die Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums.

Selbstverständlich ist auch eine kompensierte Elektrode mit verteilten Kapazitäten in Kombination mit einer Vorrichtung zur Elektrolyteinbringung einsetzbar.

Im Deckgebirge, durch das Hin- und Rückleiter zum Reservoir 100 vertikal geführt sind, ist eine Heizwirkung unerwünscht: Im vertikalen Bereich der Doppelleiter 10, 20, die noch nicht im Reservoir 100 liegt, sondern zu diesem hinunterführt, können Hinleiter 10 und Rückleiter 20 in einem kleinen Abstand von beispielsweise 1 bis 3 m platziert werden, wodurch sich deren Magnetfelder bereits in geringerem Abstand von der Doppelleitung kompensieren und die induktive Heizwirkung entsprechend verringert wird.

Als Alternative können Hinleiter 10 und Rückleiter 20 durch eine beide Leiter umschließende Schirmung aus hochleitfähigem Material umgeben werden, um die induktive Erhitzung des umliegenden Erdreichs des Deckgebirges zu vermeiden.

In weiterer Alternative ist eine koaxiale Leiteranordnung in vertikalen Bereich von Hin- und Rückleiter denkbar, die zu einer vollkommenen Auslöschung der Magnetfelder im Außenbereich und damit zu keinerlei induktiven Erhitzung des umliegenden Erdreichs führt. Der dabei erhöhte Querkapazitiätsbelag kann für die Ausführung eines Gyrators, der gemäß dem Stand der Technik eine Spannung eines spannungseinprägenden

Stromrichters in einen Wechselstrom umsetzt, mit zu Hilfe gezogen werden.

Bei allen drei genannten Methoden ist eine Kompensation des jeweiligen Induktivitätsbelags der Leiteranordnung einschließlich der evtl. vorhandenen Schirmung notwendig.

In der Figur 8 ist ein Leistungsgenerator 60 dargestellt, der als Hochfrequenzgenerator ausgebildet ist. Der Leistungsgenerator 60 ist dreiphasig aufgebaut und beinhaltet vorteilhafterweise eine transformatorische Kopplung und Leistungshalbleiter als Bauelemente. Die eigentliche, kompensierte Leiterschleife 10, 20 ist hier als Induktor 95 abstrahiert dargestellt eingezeichnet. Insbesondere beinhaltet die Schaltung einen spannungeinprägenden Wechselrichter. Eine Stromeinprägung mit Lastunabhängiger Grundschwingung, die mittels Filterbauelementen einstellbar ist, ergibt sich bei geeigneter Wahl des Anpassvierpols hinter diesem. Je nach Topologie des Anpassvierpols ergibt sich eine unterschiedliche Strombelastung des speisenden Wechselrichters.

Der gemäß Figur 7 als Leistungsgenerator ausgebildete Hochfrequenzgenerator 60 kann Leistungen bis zu 2500 kW erzeugen. Typischerweise werden Frequenzen zwischen 5 und 20 kHz verwendet.

Gegebenenfalls können auch höhere Frequenzen eingesetzt werden. Dabei entstehen im speisenden Stromrichter erhöhte, u. U. zu hohe Schaltverluste. Zur Abhilfe lassen sich:

- mehrere Wechselrichter entweder bei Resonanzfrequenz und kleiner Individualleistung und hoher Gesamtleistung parallel schalten. Beispielhaft wird auf die Topologie aus Figur 9 verwiesen, bei der spannungseinprägende Vollbrücken/Vier-Quadrantsteller parallel schaltend auf einen

- Filter speisen, der die rechteckige Ausgangsspannung in einen Ausgangsstrom umsetzt, und dessen Grundschwingungsamplitude unabhängig von der Lastimpedanz ist.
- Entsprechend lassen sich mehrere Wechselrichter wie in Figur 10 in Serie schalten.
- Alternativ können auch mehrere Wechselrichter in selber Topologie wie in Figur 10 versetzt getaktet bei niedriger Individualfrequenz betrieben, eine hohe Frequenz (Resonanzfrequenz f_r) am Transformatorausgang erzielen.

Wie bereits erwähnt, ist bei einem solchen Generator für den bestimmungsgemäßen Gebrauch ein Betrieb unter Resonanzbedingungen erforderlich, um eine Blindleistungskompensation zu erreichen. Gegebenenfalls ist die Ansteuerfrequenz im Betrieb geeignet nachzustellen.

In Figur 8 ist die Funktion des im Zusammenhang mit Figur 2 bereits erwähnten HF-Generators 60 verdeutlicht: Ausgehend von der 3phasigen Netzwechselspannungsquelle 65 wird ein dreiphasiger Gleichrichter 70 angesteuert, dem über eine Leitung mit Kondensator 71 ein dreiphasiger Wechselrichter 75 nachgeschaltet ist, der periodische Rechtecksignale geeigneter Frequenz generiert. Über ein Anpassnetzwerk 80 aus Induktivitäten 81 und Kondensatoren 82 werden Induktoren 95 als Ausgang angesteuert. Ein Verzicht auf das Anpassnetzwerk ist möglich.

Bei reiner Leiterschleife 10, 15, 20 gemäß Figur 2, die einen zweipoligen Induktor darstellt, kann auch ein einphasiger Generator genutzt werden. Solche Generatoren mit beispielsweise 440 KW bei 50 KHz sind kommerziell erhältlich.

In Figur 9 ist eine entsprechende Schaltung mit drei parallel geschalteten Wechselrichtern 75, 75', 75'' dargestellt. Nachgeschaltet ist hier ein Beispiel für ein Anpassnetzwerk 85 aus Induktivitäten 86, 86’ und 86’’. Dem Anpassnetzwerk 85 folgen wie in Figur 8 die hier nicht näher gezeigten Induktoren.

In Figur 10 ist schließlich die Funktion einer Reihenschaltung dreier Wechselrichter 75, 75', 75'' realisiert, bei der über versetzte Taktung höhere Frequenzen und Leistungen oder bei gleichphasiger Taktung höhere Spannungen und so Leistungen erreicht werden. Dafür werden die geschalteten Wechselrichter 75, 75', 75'' mittels eines Transformators 80 mit Induktivitäten 81, 81', 81''auf der Primärseite sowie Induktivitäten 82, 82', 82''auf der Sekundärseite geschaltet, so dass sich auf der Sekundärseite eine Reihenschaltung ergibt. Dem Transformator 80 kann wieder ein Anpassvierpol den Induktoren 95 vorgeschaltet werden.

Die beschriebenen HF-Generatoren lassen sich grundsätzlich wie beschrieben als spannungseinprägende Stromrichter oder entsprechend als stromeinprägenden Stromrichter in Reservoirs einsetzen, wo eine Unterstützung durch Dampf oder auch nicht erfolgt. Reservoire mit geringer horizontaler Permeabilität, welche ungenügend dampfdurchlässig sind, können mit diesem Verfahren weiträumig beheizt werden. Auch wenn die elektrische Leitfähigkeit des Reservoirs Inhomogenitäten aufweist - beispielsweise leitfähige Bereiche, die elektrisch vom Rest des Reservoirs isoliert sind, können sich in diesen Inseln Wirbelströme ausbilden und Joulesche Wärme erzeugen. Hier ist es nicht effektiv möglich, vertikale Elektroden mit resistivem Heizen einzusetzen, da dies zusammenhängende elektrisch leitfähige Bereiche zwischen den Elektroden erfordert. Zudem stehen Leitfähigkeit des Reservoirs und Permeabilität in Zusammenhang.

In Figur 11, die im Prinzip eine Kombination von Figur 1 und 2 in der Projektion darstellt, sind folgende Bezeichnungen gewählt:

0: Ausschnitt Öl-Reservoir, wiederholt sich nach beiden Seiten mehrfach

1': Horizontal-Rohr Paar („Wellpair"), mit Injektionsrohr a und Produktionsrohr b, Darstellung im Querschnitt

A: 1. horizontaler, paralleler Induktor

B: 2. horizontaler, paralleler Induktor
4: Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an den Enden der Induktoren (gemäß Figur 12)
w: Reservoirbreite, Abstand von einem Wellpair zum nächsten (typischerweise 50 bis 200 m)
h: Reservoirhöhe, Dicke der geologischen Ölschicht (typischerweise 20 bis 60 m)
d1: horizontaler Abstand von A zu 1 ist w/2
d2: vertikaler Abstand von A und B zu a: 0,1 m bis 0,9*h (typischerweise 20 m bis 60 m)

Speziell durch eine Anordnung eines Teilleiters der Leiterschleife direkt über dem Produktionsrohr hat man den Vorteil, dass der Bitumen in der Umgebung oberhalb des Produktionsrohres in vergleichweise kurzer Zeit erwärmt und damit dünnflüssig wird. Das bewirkt, dass nach vergleichweise kurzer Zeit (z. B. 6 Monate) die Produktion beginnt, die mit einer Druckentlastung des Reservoirs einhergeht. Typischerweise ist der Druck eines Reservoir limitiert und abhängig von der Stärke des Deckgebirges um ein Durchbrechen von verdampften Wassers zu verhindern (z. B. 12 bar in 120 m Tiefe, 40 bar in 400 m Tiefe, …). Da durch das elektrische Heizen der Druck im Reservoir ansteigt muss der Strombelag zum Heizen druckgeregelt erfolgen. Das wiederum heißt, dass höhere Heizleistung erst nach einsetzender Produktion möglich ist. Die frühe Förderung wird durch das nahe Anordnen der Induktoren ermöglicht. Ein nahes Anbringen zweier Induktoren, die in einer Leiterschleife eingebunden sind ist nicht möglich, da dann die Induktive Heizleistung stark verringert werden würde und der erforderlich Strombelag im Kabel zu groß werden würde.

Die zugehörige elektrische Verschaltung ergibt sich aus den Figuren 12 bis 14: Dabei ist zu unterscheiden, ob zwei oder drei Teilleiter vorhanden sind.

In Figur 13 ist A ein erster induktiver Teilleiter und B ein zweiter induktiver Teilleiter, denen ein Umrichter/Hochfrequenz-Generator 60 aus Figur 2 zugeschaltet ist.

Figur 13 zeigt eine Schaltvariante, bei der drei Induktoren genutzt werden, wobei zwei davon den halben Strom tragen. In Figur 13 ist A ein erster induktiver Teilleiter, B ein zweiter induktiver Teilleiter und C ein dritter induktiver Teilleiter, wobei die Teilleiter B und C parallel geschaltet sind. Auch andere Kombinationen der Teilleiter sind möglich. Es ist ein Umrichter/Hochfrequenz-Generator vorhanden.

Figur 14 zeigt eine Schaltvariante, bei der ebenfalls drei Induktoren genutzt werden, die jedoch an einen Drehstrom-Generator angeschlossen werden und deshalb alle denselben Strombelag aufweisen. In Figur 14 ist A ein erster induktiver Teilleiter, B ein zweiter induktiver Teilleiter und C ein dritter induktiver Teilleiter. Alle Teilleiter sind an einem Drehstrom-Umrichter/Hochfrequenz-Generator angeschaltet.

Die Schaltvarianten gemäß den Figuren 12 bis 14 werden genutzt, um die nachfolgend anhand der Figuren 15 bis 18 beschriebenen Anordnungen der Induktoren im Reservoir zu realisieren. Dabei dient ein Induktor, beispielsweise induktive Teilleiter A bzw. A', als Hinleiter und ein Induktor B bzw. B' als Rückleiter, wobei Hin- und Rückleiter in diesem Fall dieselbe Stromstärke mit einer Phasenverschiebung von 180° bezogen auf die Schnittbilder in den Figuren 15 und 16 tragen

Es können auch entsprechend Figur 13 ein Induktor A als Hin- und zwei Induktoren B und C als Rückleiter dienen. Hierbei tragen die parallelgeschalteten Rückleiter B, C je die halbe Stromstärke mit 180° Phasenverschiebung bezogen auf den Strom des Hinleiters A.

Schließlich kann ein Induktor als Hinleiter und können mehr als zwei Induktoren als Rückleiter dienen, wobei die Phasenverschiebung der Ströme des Hinleiters zu allen Rückleitern 180° beträgt und die Summe der Rückleitungsströme dem Hinleitungsstrom entsprechen.

Entsprechend Figur 14 können drei Induktoren A, B und C dieselbe Stromstärke tragen und kann die Phasenverschiebung zwischen diesen jeweils 120° betragen. Die drei Induktoren A, B, C sind eingangsseitig von einem Drehstromgenerator gespeist und ausgangsseitig in einem Sternpunkt, der innerhalb oder außerhalb des Reservoirs liegen kann und dem Verbindungselement 15 entspricht, verbunden. Dabei ist es auch möglich, dass die drei Induktoren A, B und C ungleiche Stromstärken tragen und andere Phasenverschiebungen als 120° aufweisen. Es werden Stromstärken und Phasenverschiebungen derart gewählt, dass eine Beschaltung mit Sternpunkt ermöglicht ist. In diesem Fall entspricht zu jedem Zeitpunkt die Summe der Hinleitungsströme der Summe der Rückleitungsströme.

In Figur 15 ist eine erste vorteilhafte Ausführungsform für ein EMGD-Verfahren dargestellt. Es ist ein erster Induktor über dem Produktionsrohr und ist ein zweiter Induktor auf der Symmetrielinie vorhanden. Es sind folgende Bezeichnungen gewählt:

0: Ausschnitt Öl-Reservoir, wiederholt sich nach beiden Seiten mehrfach
b: Produktionsrohr, Darstellung im Querschnitt
A: 1. horizontaler, paralleler Induktor
B: 2. horizontaler, paralleler Induktor
A‘: 1. horizontaler, paralleler Induktor des benachbarten Reservoir-Abschnitts
4: Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an den Enden der Induktoren (gemäß Figur 4)
w: Reservoirbreite, Abstand von einem Wellpair zum nächsten (typischerweise 50 bis 200 m)
h: Reservoirhöhe, Dicke der geologischen Ölschicht (typischerweise 20 bis 60 m)
d1: horizontaler Abstand von A zu B (w/2)
d2: vertikaler Abstand von B zu b: bevorzugt 2 m bis 20 m
d3: vertikaler Abstand von A zu b: bevorzugt 10m bis 20 m

In Figur 16 ist eine weitere vorteilhafte Ausführungsform für ein EMGD-Verfahren dargestellt. Es ist ein erster Induktor

über dem Produktionsrohr und ein zweiter Induktor auf der Symmetrielinie vorhanden, wobei aber in Abweichung zu Figur 15 zwei getrennte Stromkreise vorhanden sind. Es sind folgende Bezeichnungen gewählt:

0: Ausschnitt Öl-Reservoir, wiederholt sich nach beiden Seiten mehrfach
b: Produktionsrohr, Darstellung im Querschnitt
A: 1. horizontaler, paralleler Induktor
B: 2. horizontaler, paralleler Induktor
A‘: 1. horizontaler paralleler Induktor des benachbarten Reservoir-Abschnitts
B‘: 2. horizontaler paralleler Induktor des benachbarten Reservoir-Abschnitts
4: Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an den Enden der Induktoren (gemäß Figur 13)
w: Reservoirbreite, Abstand von einem Wellpair zum nächsten (typischerweise 50 bis 200 m)
h: Reservoirhöhe, Dicke der geologischen Ölschicht (typischerweise 20 bis 60 m)
d1: horizontaler Abstand von A zu B (w/2)
d2: vertikaler Abstand von B zu b: bevorzugt 2 m bis 20 m
d3: vertikaler Abstand von A zu b: bevorzugt 10 m bis 20 m.

In Figur 17 ist eine dritte vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung für ein EMGD-Verfahren dargestellt. Es ist ein erster Induktor über dem Produktionsrohr und zwei Induktoren auf der Symmetrielinie vorhanden, wobei der Stromkreis verzweigt ist. Es sind folgende Bezeichnungen gewählt:

0: Produktionsrohr, Darstellung im Querschnitt
A: 1. horizontaler, paralleler Induktor direkt über dem Produktionsrohr b
B: 2. horizontaler, paralleler Induktor auf der Symmetrielinie zum benachbarten Reservoirabschnitt
C: 3. horizontaler, paralleler Induktor auf der Symmetrielinie zum benachbarten Reservoirabschnitt
4: Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an

den Enden der Induktoren (gemäß Figur 13)
5: Zweite Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an den Enden der Induktoren
w: Reservoirbreite, Abstand von einem Wellpair zum nächsten (typischerweise 50 bis 200 m)
h: Reservoirhöhe, Dicke der geologischen Ölschicht (typischerweise 20 bis 60 m)
d1: horizontaler Abstand von A zu C (w/2)
d2: vertikaler Abstand von A zu b: bevorzugt 2 m bis 20 m
d3: vertikaler Abstand von C zu b: bevorzugt 10m bis 20 m.

In Figur 18 ist eine vierte vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung für ei EMGD-Verfahren dargestellt. Es ist ein erster Induktor über dem Produktionsrohr und sind zwei weitere Induktoren mit seitlichem Versatz vorhanden, wobei wiederum ein verzweigter Stromkreis vorliegt. Es sind folgende Bezeichnungen gewählt:
0: Ausschnitt Öl-Reservoir, wiederholt sich nach beiden Seiten mehrfach
b: Produktionsrohr, Darstellung im Querschnitt
A: 1. horizontaler, paralleler Induktor direkt über dem Produktionsrohr b
B: 2. horizontaler, paralleler Induktor
C: 3. horizontaler, paralleler Induktor
4: Induktive Bestromung durch elektrisches Verbinden an den Enden der Induktoren (gemäß Figur 13 oder 14)
w: Reservoirbreite, Abstand von einem Wellpair zum nächsten (typischerweise 50 bis 200 m)
h: Reservoirhöhe, Dicke der geologischen Ölschicht (typischerweise 20 bis 60 m)
d1: horizontaler Abstand von A zu C sowie B zu A (w/2)
d2: vertikaler Abstand von A zu b: bevorzugt 2 m bis 20 m
d3: vertikaler Abstand von C und B zu b: bevorzugt 5 m bis 20 m.

Vorstehend wurden verschiedene Varianten beschrieben, die den Gegenstand der Hauptpatentanmeldung für das EMGD-Verfahren konkretisieren. Folgende Varianten werden als besonders vorteilhaft angesehen:

- Figur 15 mit der Schaltvariante nach Figur 12. Ein Induktor B befindet sich über dem Produktionsrohr b, der zweite Induktor A befindet sich auf der Symmetriegrenze zum benachbarten Teilreservoir.
- Figur 16 mit zwei Stromkreisen und Schaltvariante nach Figur 12. Zwei Induktoren A und A' befinden sich auf den Symmetriegrenzen zu den benachbarten Teilreservoiren. Zwei Induktoren B und B' befinden sich über dem Produktionsrohr b sowie dem hier nicht dargestellten Produktionsrohr des benachbarten Teilreservoirs.
- Figur 17 mit Schaltvariante nach Figur 13 oder 14. Ein Induktor A befindet sich über dem Produktionsrohr b, der zweite Induktor B befindet sich auf der Symmetriegrenze zum linken benachbarten Teilreservoir. Der dritte Induktor C befindet sich auf der Symmetriegrenze zum rechten benachbarten Teilreservoir.
- Figur 18 mit Schaltvariante nach Figur 13 oder 14. Ein Induktor A befindet sich über dem Produktionsrohr b, der zweite Induktor B befindet sich im horizontalen Abstand d1 von letzterem. Der dritte Induktor C befindet sich ebenfalls im horizontalen Abstand d1 jedoch auf der anderen Seite.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur „in situ"-Förderung von Bitumen oder Schwerstöl aus Ölsand-Lagerstätten als Reservoir, wobei das Reservoir mit Wärmeenergie zur Verringerung der Viskosität des Bitumens oder Schwerstöls beaufschlagt wird, wozu wenigstens eine elektrische/elektromagnetische Heizung vorgesehen und ein Förderrohr zum Wegführen des verflüssigten Bitumen oder Schwerstöl vorhanden sind, dadurch gekennzeichnet, dass in vorgegebener Tiefe des Reservoirs (1) wenigstens zwei linear ausgedehnte Leiter (10, 20) parallel in horizontaler Ausrichtung geführt sind, wobei die Enden der Leiter (10, 20) innerhalb oder außerhalb der Reservoirs (100) elektrisch leitend verbunden sind und zusammen eine Leiterschleife (10, 15, 20) bilden, die einen vorgegebenen komplexen Widerstand realisiert und außerhalb des Reservoirs (100) an einen externen Wechselstromgenerator (60) für elektrische Leistung angeschlossen sind, wobei die Induktivität der Leiterschleife (10, 15, 20) abschnittsweise kompensiert ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zu den mit elektrischer Leistung versorgten Leitern (10, 20) ein Injektionsrohr (101) zur Beheizung des Reservoirs (1) mit Wasserdampf vorhanden ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) in gleicher Tiefe des Reservoirs(100) nebeneinander in vorgegebenem Abstand, vorzugsweise 5 bis 60 m, geführt sind.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) in unterschiedlicher Tiefe des Reservoirs (100) übereinander in vorgegebenem Abstand, vorzugsweise 5 bis 60 m, geführt sind.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die abschnittsweise Kompensation der Leitungsinduktivitäten (L_i) durch Serienkapazitäten (C_i) erfolgt.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) einen runden Querschnitt mit einem Außendurchmesser zwischen 10 und 50 cm (0,1 bis 0,5 m) haben.

7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) rohrförmig ausgebildet sind und dass bei den Leitern (10, 20) jeweils Kondensatoren (C_i) für den Hin- bzw. Rückleiter vorhanden sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein isolierendes Rohr (30) für die rohrförmigen Leiter (10, 20) vorhanden ist, in dem jeweils gegenüber liegend abschnittsweise eine rohrförmige Außenelektrode (32) und eine rohrförmige Innenelektrode (34) angeordnet sind, welche jeweils über ein Dielektrikum (33) miteinander gekoppelt sind.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erhöhung der Kapazität oder Erhöhung der Spannungsfestigkeit mehrere Kondensatorelektroden (32, 34, 35) parallel geschaltet sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Dielektrikum (33) aus Keramik, beispielsweise Aluminiumsilikate ($Al_6Si_2O_{13}$) oder aus Kompositen auf der Basis Teflon, Glasfaser und Keramik, gebildet ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das die Elektroden (32, 34, 35) umfassende Rohr (30) eine Isolationsschicht (31) aufweist oder vollständig aus einem Isolator gebildet wird.

12. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass Mittel (40 bis 44) zur Zuführung eines Elektrolyten (45) für die rohrförmigen Leiter aus Außenelektrode (32), Dielektrikum (33) und Innenelektrode (34, 35) vorhanden sind.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,

dass der Elektrolyt (45) innerhalb des Leiters geführt wird.

14. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Elektrolyt (45) jeweils abschnittsweise aus dem Rohr (30) ausgeleitet werden kann.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass Auslässe (41 bis 44) mit Ventilen zur Ausleitung des Elektrolyten (45) aus dem Rohr (30, 40) vorhanden sind.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Ventile zeitlich und räumlich abschnittsweise, also unabhängig voneinander, einstellbar ist, insbesondere geöffnet und geschlossen werden können.

17. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die abgestimmte Leiterschleife (10, 15, 20) von einem HF-Leistungsgenerator (60) bei der Resonanzfrequenz (f_r) betrieben wird.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass als HF-Leistungsgenerator (60) ein Leistungselektronisches Betriebsmittel eingesetzt wird, das ein- oder mehrphasig, vorzugsweise dreiphasig, ausgebildet ist.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der HF-Leistungsgenerator durch einen frequenzgesteuerten Umrichter (60 bis 80) gebildet wird.

20. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass ein HF-Leistungsgenerator (60) vorhanden ist, dessen Ausgangsfrequenz mit der Resonanzfrequenz (fr) der kompensierten Leiterschleife (10, 15, 20) abgestimmt ist.

21. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der HF-Leistungsgenerator (60) außerhalb vom Reservoir (100) in einem abgeschlossenen Behälter angeordnet ist und im Behälter außerhalb des Reservoirs (100) an die Leiterschleife

(10, 15, 20) ankoppelbar ist.

22. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die kompensierte Leiterschleife (10, 15, 20) mehrphasig, beispielsweise dreiphasig ausgebildet ist.

23. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Leistungsgenerator (60) als HF-Generator elektrische Leistungen bis 2500 kW bei 5 bis 200 kHz, beispielsweise 450 kW bei 50KHz, liefert.

24. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass der Leistungsgenerator (60) durch Parallelschaltung mehrerer Stromrichter (75, 75', 75'') gebildet wird, so dass eine möglichst hohe Ausgangsleistung erzielt wird.

25. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass der Leistungsgenerator (60) durch Serienschaltung mehrerer Stromrichter (75, 75', 75'') gebildet wird, so dass eine möglichst hohe Ausgangsleistung erzielt wird.

26. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Leistung des Leistungsgenerators (60) durch versetztes Takten einzelner Wechselrichter (75, 75', 75'') generiert wird, womit eine hohe Ausgangsleistung bei individuell niedriger Schaltfrequenz erzielbar ist.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (75, 75', 75'') aus Leistungshalbleitern aufgebaut sind.

28. Vorrichtung nach einem Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein Ausgangstransformator (80) zur Spannungsanpassung verwendet wird.

29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein stromeinprägender Stromrichter sein

Ausgangssignal ggf. zur Spannungseinprägung in ein lastunabhängiges Spannungssignal umwandelt.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein spannungseinprägender Stromrichter sein Ausgangssignal ggf. zur Stromeinprägung in ein lastunabhängiges Stromsignal umwandelt.

31.Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass einer der Leiter (10, 15) der Leiterschleife (10, 15, 20) im Wesentlichen senkrecht über dem Förderrohr (102) angeordnet ist.

32. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Abweichung der Leiterschleife (10, 15, 20) von der senkrechten Anordnung über dem Förderrohr (102) kleiner als der Abstand (d2) vom Förderrohr (102) ist.

33. Vorrichtung nach Anspruch 31 oder 32, dadurch gekennzeichnet, dass die seitliche Abweichung der Leiterschleife (10, 15, 20) von der senkrechten Anordnung über dem Förderrohr (102) weniger als 10 m beträgt.

34. Vorrichtung nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, dass die seitliche Abweichung der Leiterschleife (10, 15, 20) von der senkrechten Anordnung über dem Förderrohr (102) weniger als 5 m beträgt.

35. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) in unterschiedlicher Tiefe des Reservoirs (100) seitlich versetzt in vorgegebenem Abstand, vorzugsweise 5 bis 60 m, geführt sind.

36. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (10, 20) in unterschiedlicher Tiefe des Reservoirs (100) übereinander ohne seitlichen Versatz in vorgegebenem Abstand, vorzugsweise 5 bis 60 m, geführt sind.

37. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass ein Induktor (induktiver Teilleiter (A bzw. A') als Hinleiter und ein Induktor (B bzw. B') als Rückleiter dient, wobei Hin- und Rückleiter (A, B bzw. A'; B') dieselbe Stromstärke mit einer Phasenverschiebung von 180° tragen.

38. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass ein Induktor (A) als Hin- und zwei Induktoren (B, C) als Rückleiter dienen, wobei die Rückleiter (B, C) je die halbe Stromstärke mit 180° Phasenverschiebung bezogen auf den Strom des Hinleiters (A) tragen.

39. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass ein Induktor als Hinleiter und mehr als zwei Induktoren als Rückleiter dienen, wobei die Phasenverschiebung der Ströme des Hinleiters zu allen Rückleitern 180° beträgt und die Summe der Rückleitungsströme dem Hinleitungsstrom entsprechen.

40. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass drei Induktoren (A, B, C) dieselbe Stromstärke tragen und die Phasenverschiebung zwischen den jeweils 120° betragen.

41. Vorrichtung nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass die drei Induktoren (A, B, C) eingangsseitig von einem Drehstromgenerator gespeist und ausgangsseitig in einem Sternpunkt verbunden sind.

42. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass drei Induktoren (A, B, C) ungleiche Stromstärken tragen und andere als 120° Phasenverschiebungen aufweisen, wobei Stromstärken und Phasenverschiebungen derart gewählt sind, dass eine Beschaltung mit Sternpunkt ermöglicht ist.

FIG 1
(Stand der Technik)

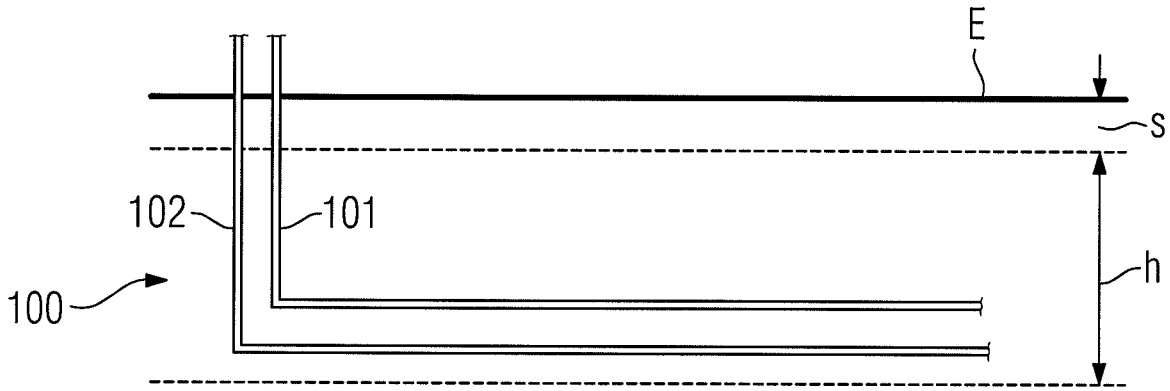


FIG 2

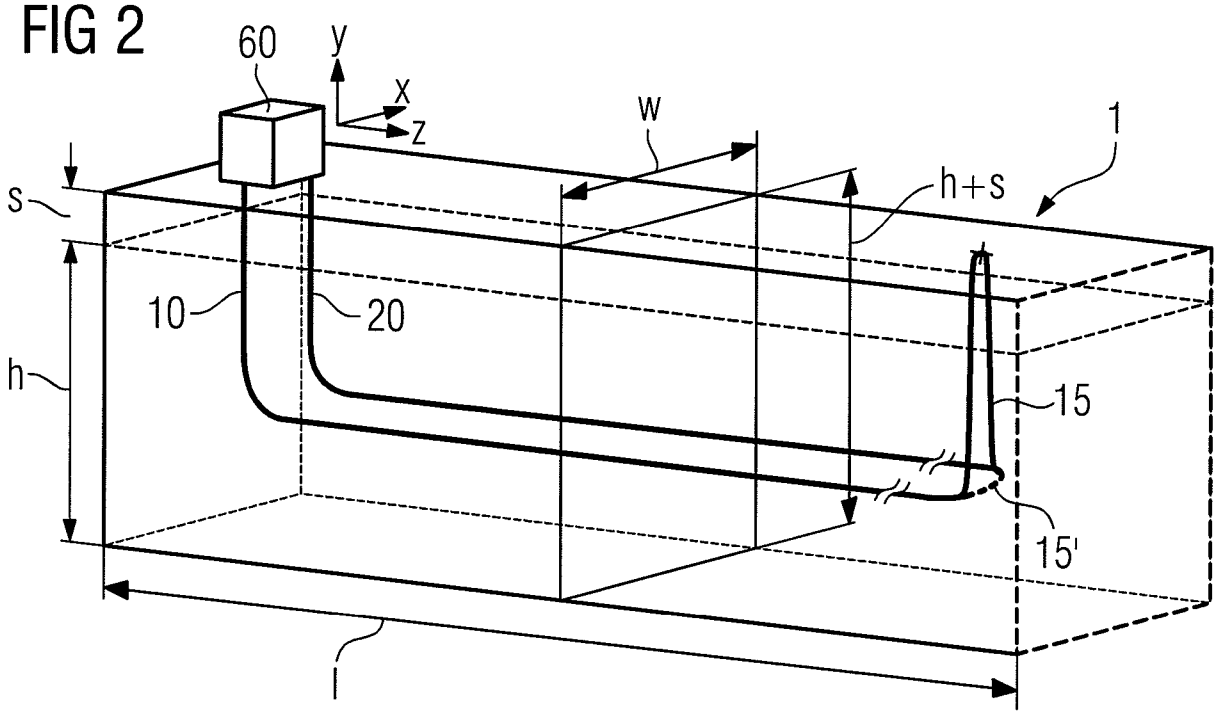


FIG 3

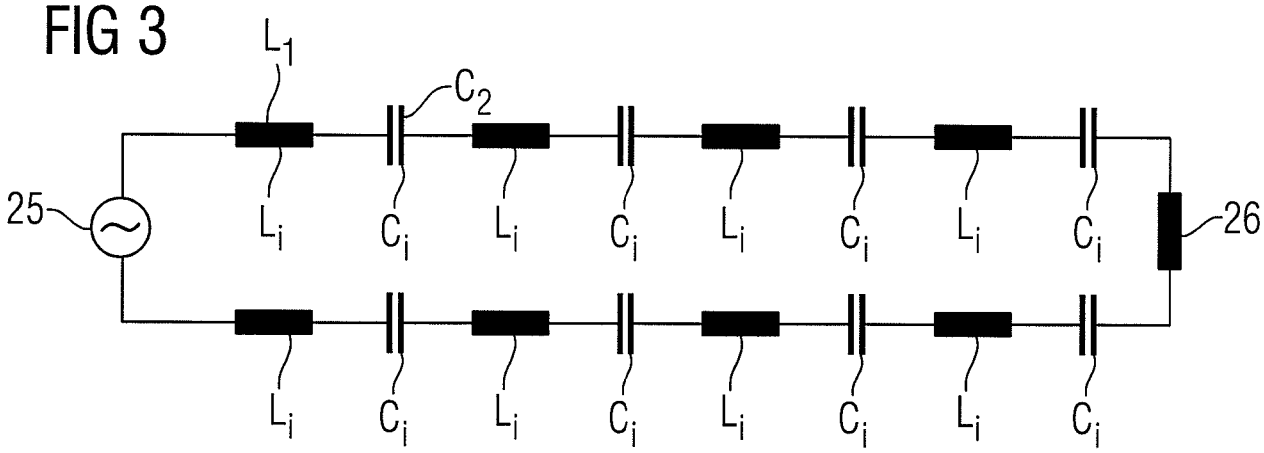


FIG 4

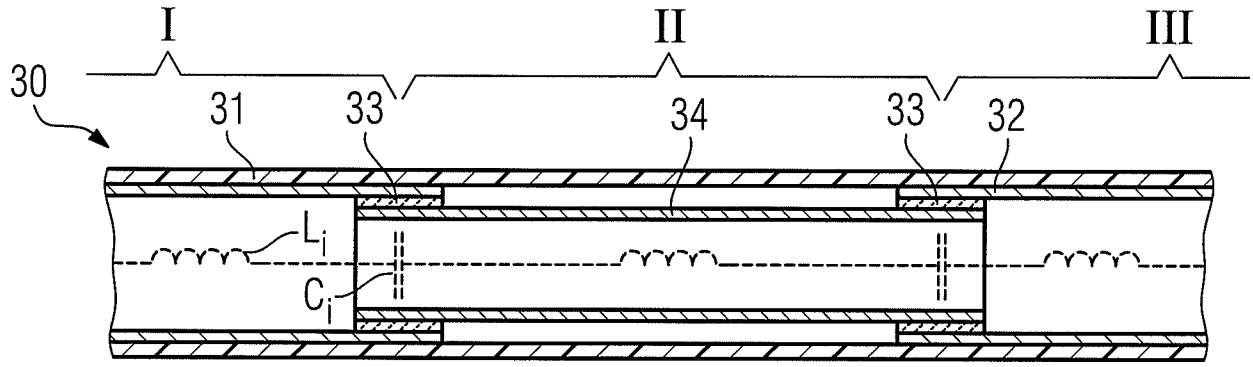


FIG 5

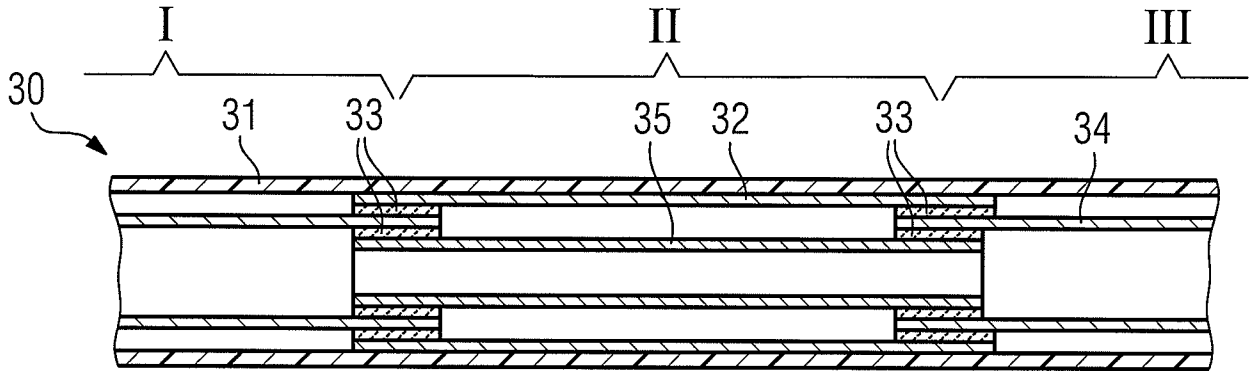


FIG 6

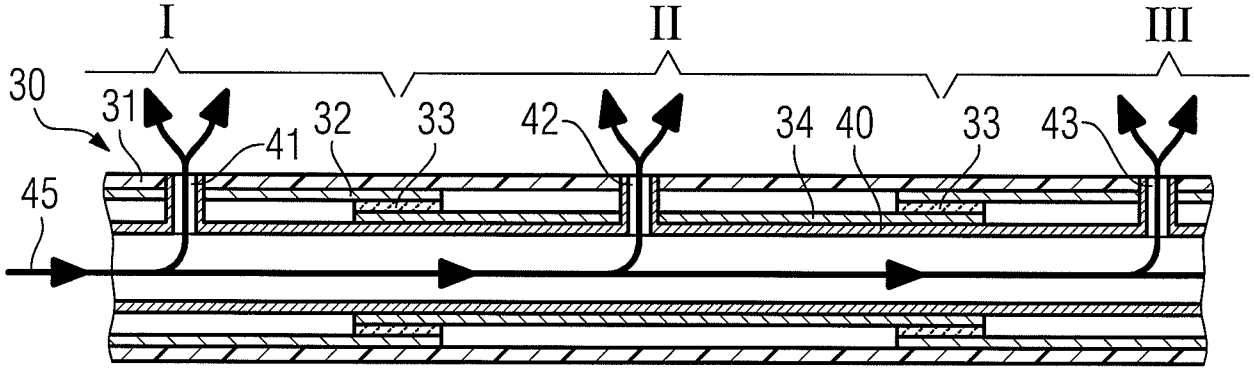


FIG 7A

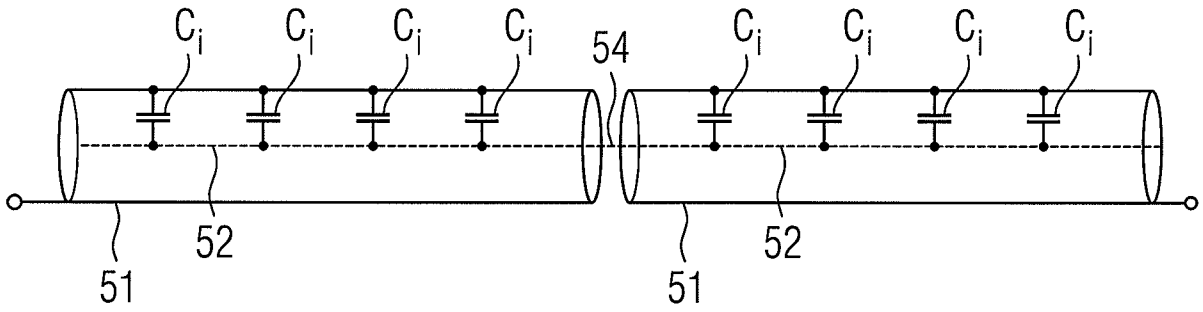

C_i
C_i
C_i
C_i
54
C_i
C_i
C_i
C_i
51
52
51
52

FIG 7B

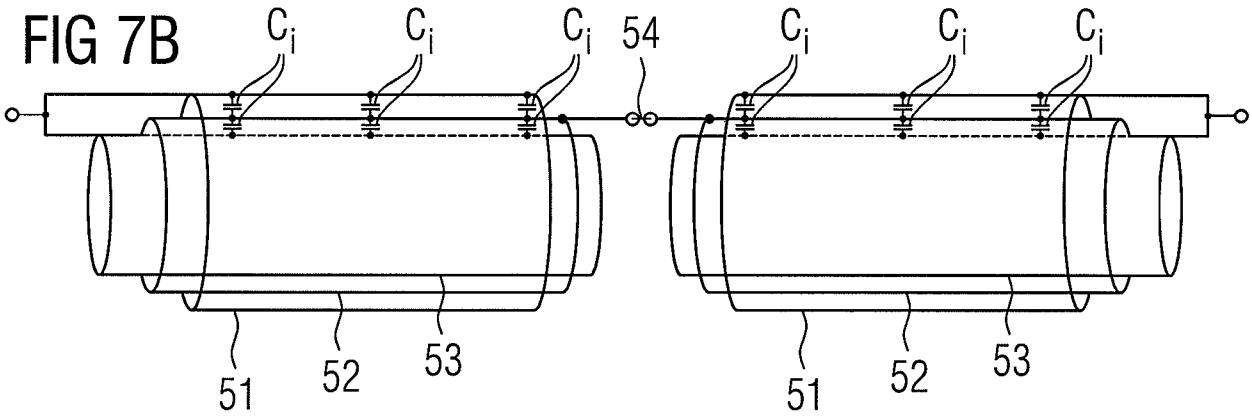

C_i
C_i
C_i
54
C_i
C_i
C_i
51
52
53
51
52
53

FIG 8

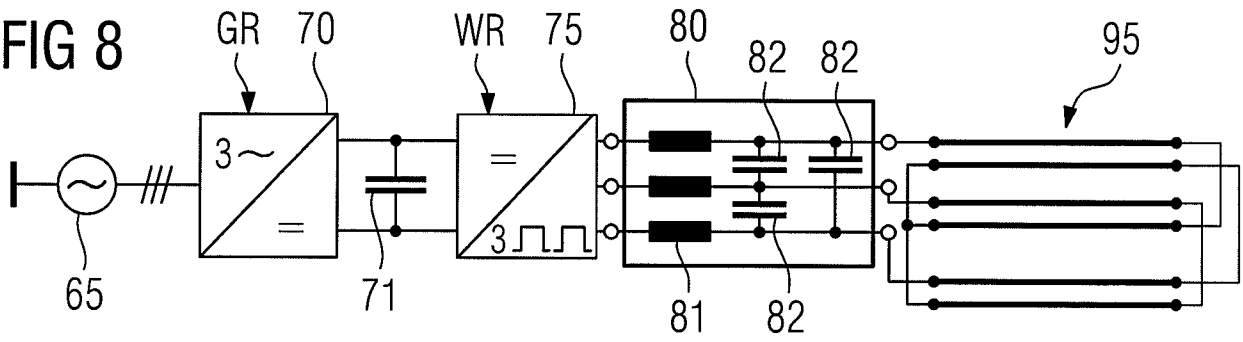


FIG 9

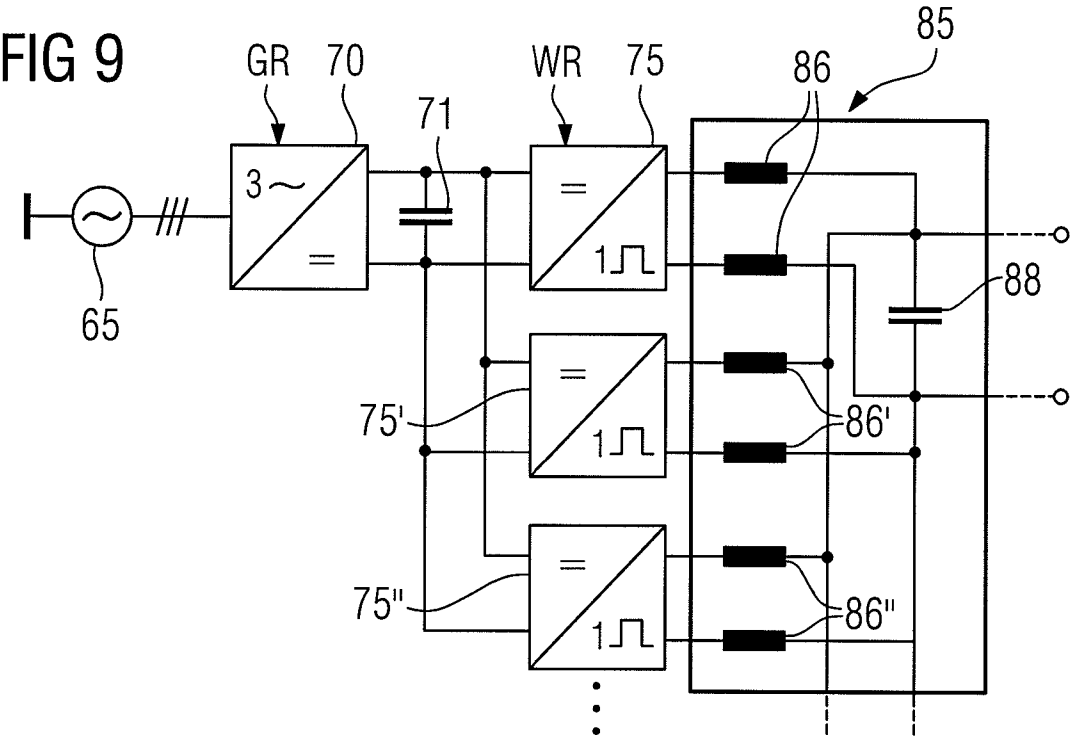


FIG 10

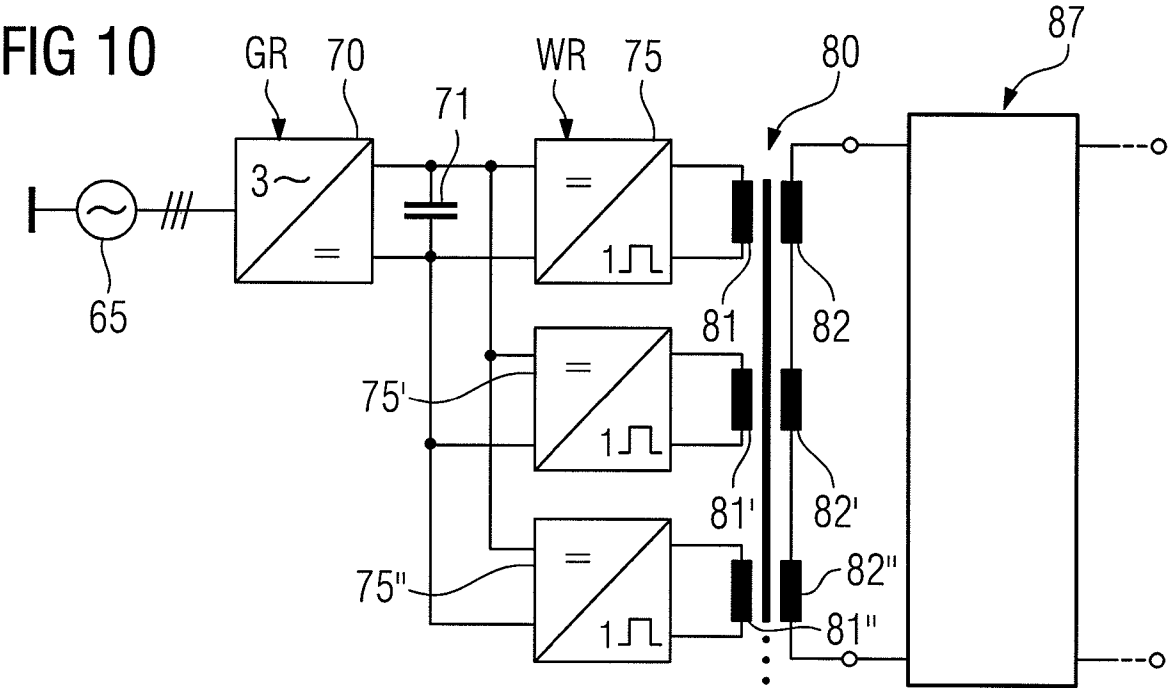


FIG 11

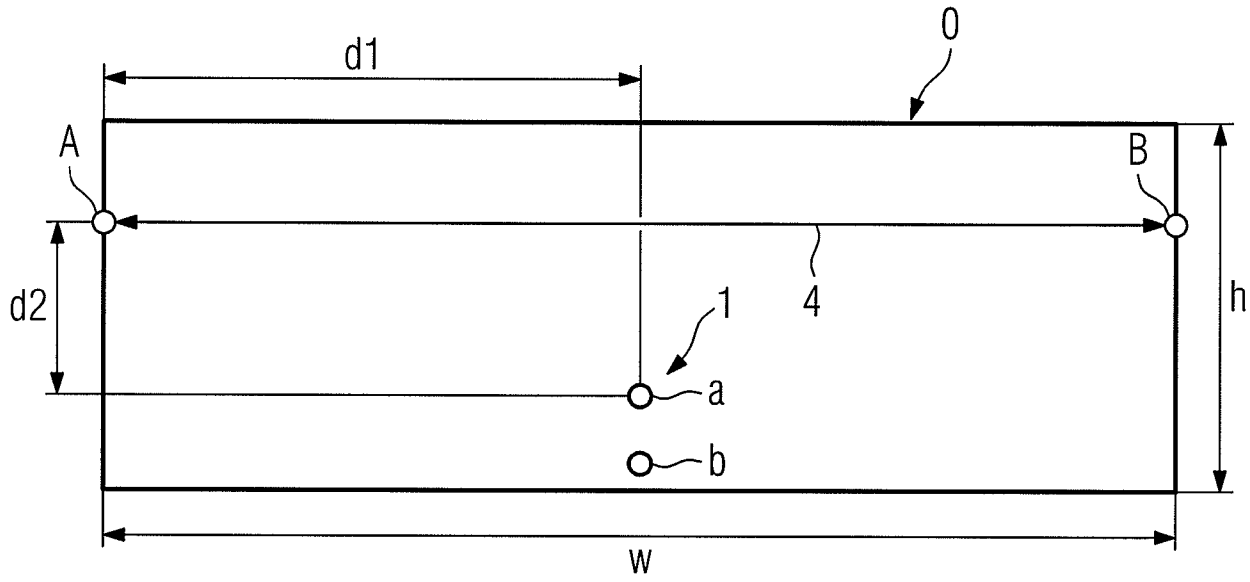


FIG 12

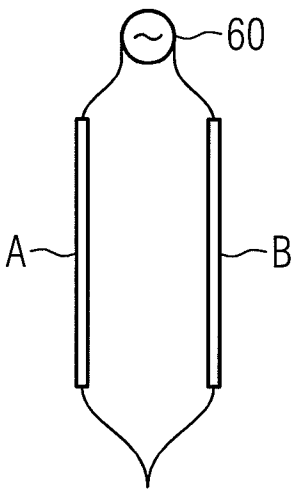


FIG 13

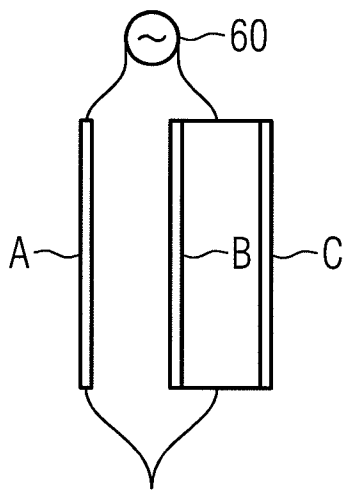


FIG 14

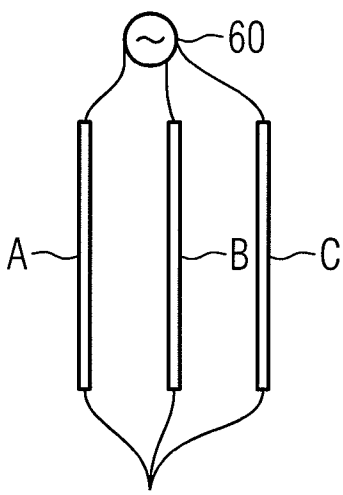


FIG 15

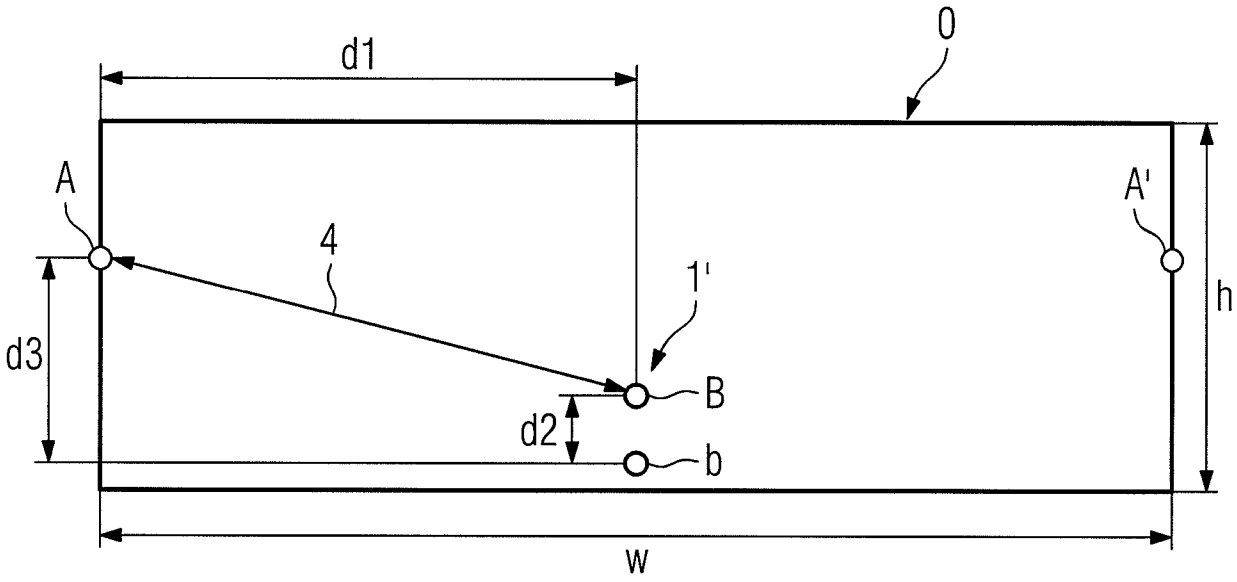


FIG 16

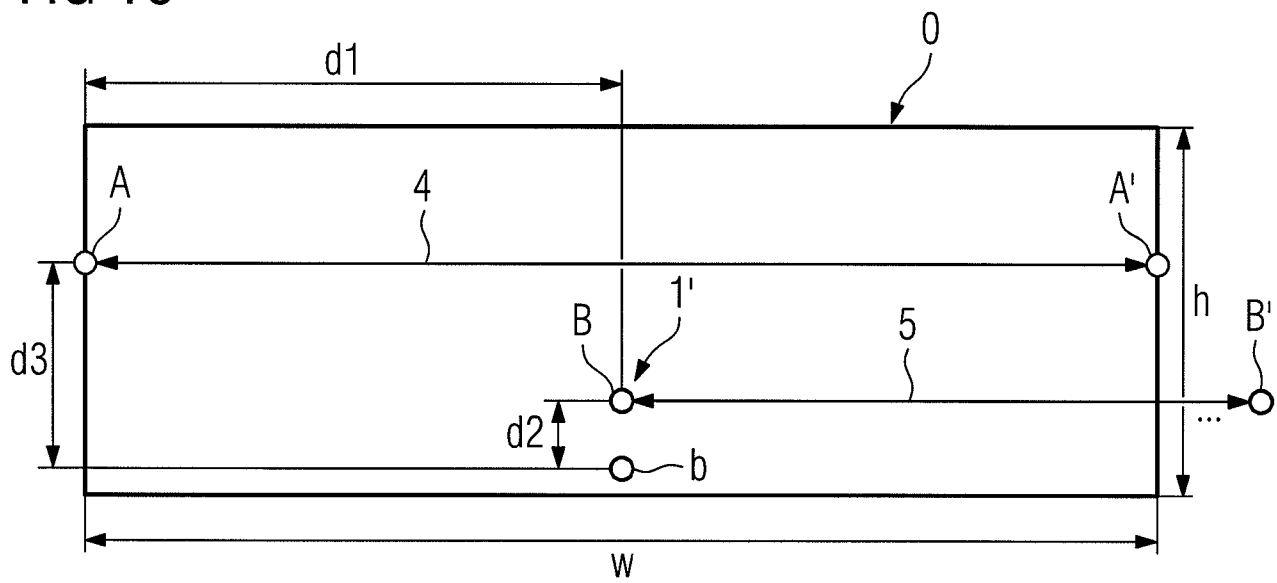


FIG 17

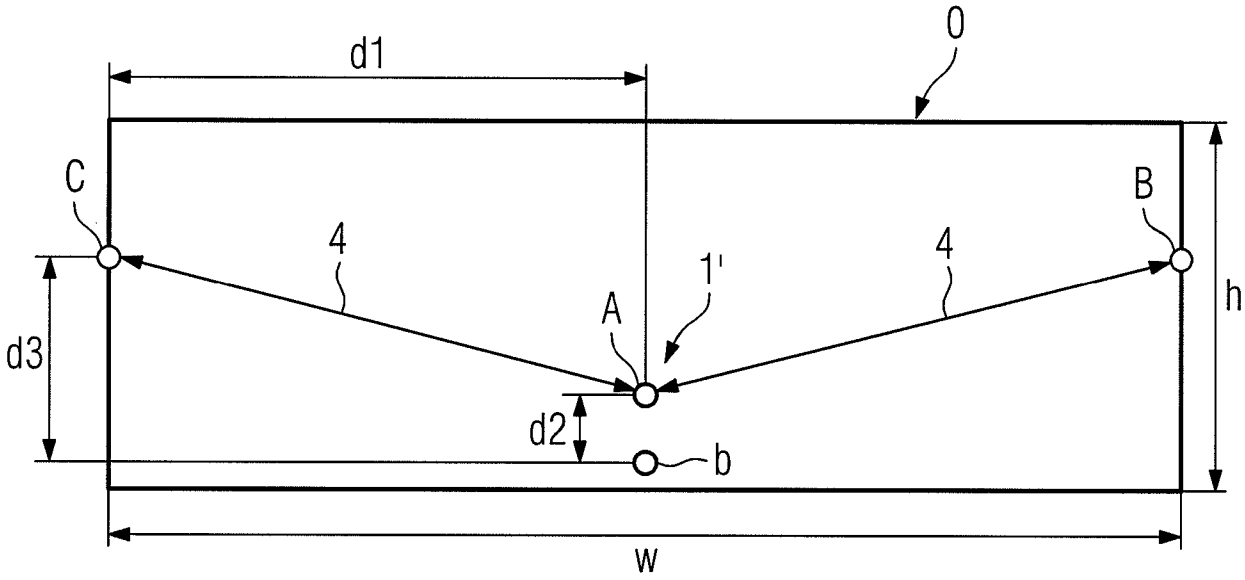


FIG 18

