



(12)

Gebrauchsmusterschrift

(21) Aktenzeichen: **20 2017 102 723.6**
(22) Anmeldetag: **08.05.2017**
(47) Eintragungstag: **01.06.2017**
(45) Bekanntmachungstag im Patentblatt: **13.07.2017**

(51) Int Cl.: **A61N 2/04 (2006.01)**
A61N 1/18 (2006.01)

(66) Innere Priorität:
10 2017 108 084.8 13.04.2017

(74) Name und Wohnsitz des Vertreters:
**Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG
mbB, 80802 München, DE**

(73) Name und Wohnsitz des Inhabers:
**Universität der Bundeswehr München, 85579
Neubiberg, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Pulsquelle für die magnetisch induktive Nervenreizung**

(57) Hauptanspruch: Pulsquelle für die Applikation von induzierten elektrischen Pulsen im medizinischen Bereich, mit

einer modular aufgebauten Pulsquelle zur Erzeugung von Spannungspulsen mit steuerbarem zeitlichen Verlauf, einer mit der modular aufgebauten Pulsquelle verschalteten Stimulationsspule zum Erzeugen eines Magnetfeldes aufgrund der auf die Stimulationsspule einwirkenden Spannungspulse, zur Erzeugung induzierter elektrischer Pulse, und einer Ladeschaltung,

wobei die modular aufgebaute Pulsquelle aufweist: mindestens ein über die Ladeschaltung aufzuladendes Hauptmodul,

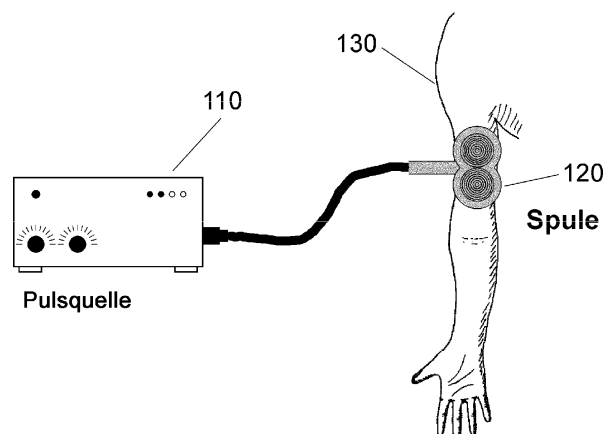
$n - 1$ weitere Module, wobei n ganzzahlig ist und gilt $n \geq 2$, wobei alle mindestens n Module über ihre Modulanschlüsse seriell miteinander verschaltet sind,

wobei jedes Modul eine Energiespeichereinrichtung, vorzugsweise einen Kondensator zum Speichern von Ladung aufweist sowie jedes Modul Schalteinrichtungen aufweist, vorzugsweise gebildet durch Transistoren, zum wahlweise und gesteuertem Einstellen zumindest eines aktiven Normalbetriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung in den Spannungspfad der Serienschaltung einbringt und eines Bypass-Betriebs in dem das jeweilige Modul den Spannungspfad der Serienschaltung nur durchschaltet sowie vorzugsweise eines invertierten Betriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung invertiert in den seriellen Spannungspfad einbringt,

einer Controller-Einrichtung zum direkten oder indirekten Erfassen der Ladungszustände der Energiespeichereinrichtungen aller n Module und zum Steuern der Schaltzustände der Schalteinrichtungen aller n Module, um für jedes der n Module zu einem bestimmten Zeitpunkt jeweils wahlweise einen bestimmten Betriebszustand einstellen zu können,

wobei die Controller-Einrichtung so ausgelegt ist, dass der Ladungszustand jedes Energiespeicherelements eines jeweiligen Moduls im Betrieb der Pulsquelle über einen Applikationszeitraum im wesentlichen zwischen vorgegebe-

nen Grenzwerten gehalten wird und damit im aktiven Betrieb des jeweiligen Moduls zu einem vorbestimmten Spannungsbeitrag im Spannungspfad führt und wobei die Spannungsbeiträge der Module im Applikationszeitraum unterschiedlich sind und vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen zueinander abgestuft sind, entsprechend U_0 , $U_0/2$, $U_0/4$, $U_0/8$ etc., und wobei die Stimulationsspule mit der Ausgangsspannung der Serienschaltung der Module gekoppelt ist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein Vorrichtungen zur Reizung von Nerven- und Muskelzellen im Körpergewebe nach dem Prinzip der induktiven Magnetstimulation durch kurze starke Magnetfeldpulse die über eine Spule und eine entsprechende Pulsquelle erzeugt werden. Weiterhin betrifft die Erfindung elektrische Leistungskreise für die Pulsquelle zur Erzeugung frei wählbarer Zeitverläufe von kurzen starken Strompulsen durch die Spule um die pulsformigen Magnetfelder zur Reizung von Nerven- oder Muskelzellen zu erzeugen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Allgemein können durch von außen einwirkende elektrische Felder im Körpergewebe bestimmte Zellen gereizt werden. Speziell Nerven- oder Muskelzellen können über die durch ein äußeres Feld angeregte Depolarisation eines Axons bzw. eines Faserbündels und der dadurch erzeugten Auslösung von Aktionspotentialen und der nachfolgenden Reizweiterleitung erregt werden. Dies geschieht dadurch, dass die elektrischen Felder im Gewebe elektrische Ströme verursachen, welche wiederum in diesen Zellen die Aktionspotentiale auslösen. Diese Art der Auslösung von Aktionspotentialen durch ein direkt am Axon einwirkendes elektrisches Feld ist ein nicht-physiologischer Prozess: In der Natur werden Aktionspotentiale im Zellkörper der Nervenzelle selbst erzeugt, nachdem über die Dendriten einlaufende Signale entsprechend verknüpft wurden.

[0003] Das von außen einwirkende elektrische Feld muss zur Auslösung eines solchen Aktionspotentials hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes gewisse Bedingungen erfüllen. Weiterhin muss auch eine gewisse Mindeststärke erreicht werden. Insbesondere reagieren unterschiedliche Zelltypen bezüglich der Auslösung eines Aktionspotentials auch unterschiedlich auf die Zeitverläufe und Stärken der von außen einwirkenden Felder. Beispielsweise benötigen sensorische Nervenfasern, die auch für die Weiterleitung von Schmerzsignalen zuständig sind, wegen ihres geringeren Durchmessers eine höhere elektrische Feldstärke zur Depolarisation (d.h. zur Auslösung eines Aktionspotentials) im Vergleich zu motorischen Nervenfasern. Somit ist es möglich, bei moderaten Reizstärken nur die motorischen, nicht aber die sensorischen Fasern anzuregen und somit nahezu schmerzfrei Nerven zu reizen.

[0004] Insbesondere kann für diese Art der Reizung auch das Prinzip der magnetischen Induktion eingesetzt werden. Dabei erzeugt ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld ein induziertes elektrisches Feld. Das zeitlich veränderliche Magnetfeld kann durch eine Spule erzeugt werden, welche von einem zeitlich veränderlichen Strom durchflos-

sen wird. Diese Spule, liegt beispielsweise auf der Haut über dem zu reizenden Nervengewebe auf, so dass das erzeugte Magnetfeld das Gewebe durchdringen kann und nach dem Induktionsprinzip die für die Reizung erforderlichen Ströme im Gewebe erzeugt. Die Reizung durch diese sogenannte induktive Magnetstimulation kann dabei berührungslos erfolgen, da das Magnetfeld Körpergewebe nahezu ungehindert durchdringen kann. Die zeitabhängigen Magnetfelder werden über kurze Strompulse einer Dauer von üblicherweise 50–400 Mikrosekunden erzeugt. Das Prinzip der induktiven Reizung basiert grundsätzlich auf einer zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes, da nur so elektrische Felder von der Spule im Gewebe induziert werden können. Somit können auch nur zeitlich veränderliche elektrische Felder im Gewebe entstehen. Daher können hier beispielsweise keine effizienten einfachen monophasischen Rechteckpulse mit Gleichanteil erzeugt werden, wie sie bei der Elektrostimulation eingesetzt werden.

[0005] Ein wesentlicher Vorteil der induktiven Magnetstimulation liegt in der Berührungslosigkeit, da das Magnetfeld der Spule Körpergewebe auch in einem gewissen Abstand zur Spule erreicht. Daher können Nervenzellen auch steril gereizt werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil besteht darin, dass das System im Gegensatz zur elektrischen Stimulation über Elektroden nahezu völlig schmerzfrei ist, da anders als bei der Elektrostimulation keine hohen Stromdichten an Einspeiseorten von Elektroden entstehen können, welche bei der elektrischen Stimulation die entsprechenden Hautsensoren reizen und eine Schmerzempfindung verursachen. Aus diesen Gründen eignet sich das System auch besonders gut zur Reizung tief liegender Gewebestrukturen (z.B. die Gehirnrinde durch den Schädelknochen hindurch) und zur schmerzfreien Muskelstimulation z.B. im Bereich der Rehabilitation.

[0006] Infolge dieser Vorteile konnte sich die induktive Magnetstimulation gegenüber der Elektrostimulation bereits in einigen Bereichen durchsetzen oder sogar neue Anwendungsgebiete erschließen. Sehr verbreitet ist das System zur Anwendung auf das zentrale sowie das periphere Nervensystem.

[0007] Momentan handelt es sich um das einzige nicht-invasive System, mit dem ohne Schmerzen der Person beispielsweise bestimmte Gehirnbereiche gezielt in der Weise angesprochen werden können, (d.h. Auslösen von Nervenaktionspotentialen oder unterschwellige Beeinflussung von Nervenzellen in diesen Bereichen), dass Reaktionen der Nervenzellen vom Körper genauso oder zumindest sehr ähnlich wie natürlich entstandene Nervenimpulse verarbeitet werden.

[0008] Die induktive Magnetstimulation wird in der Grundlagenforschung als Instrument zur gemeinsamen Untersuchung zusammen mit der funktionellen Magnetresonanztomographie eingesetzt. Über Pulse ist eine gezielte Anregung (und Hemmung) bestimmter Hirnareale erzeugbar, deren Auswirkungen wiederum mit der Magnetresonanztomographie untersucht werden können.

[0009] Ein Anwendungsgebiet besteht im sogenannten Corticalen Mapping, bei dem über sehr zielgenaue induktive Reize an der Hirnrind (durch das intakte Schädeldach) funktionale Zuordnungen des Motorcortex durchgeführt werden. Auf diese Weise kann präoperativ die Planung für Hirntumor-Operationen entscheidend verbessert werden.

[0010] Weiterhin bestehen Anwendungen der induktiven Magnetstimulation hinsichtlich peripherer motorischer Nerven. Hierbei ist besonders die repetitive Dauerstimulation mit schnellen Pulsfolgen (ca. 10 bis 50 Pulse pro Sekunde) von großer Bedeutung, da hierdurch kontinuierliche Muskelkontraktionen erzeugt werden können, deren Stärke durch die Intensität der Stimulationpulse steuerbar ist. Darüber sind Anwendungen bei im Hochleistungssport eingesetzten Geräten bekannt.

[0011] Fig. 1 zeigt eine typische Anordnung des bisherigen Einsatzes der induktiven Magnetstimulation. Die Pulsquelle **110** erzeugt einen kurzen starken Strompuls und leitet diesen an die Spule **120**. Die Spule **120** wird nahe des zu reizenden Nervengewebes des Körpers positioniert, so dass das erzeugte Magnetfeld diese Gewebestruktur durchdringen kann. Das von der Spule erzeugte magnetische Feld induziert im Körpergewebe, hier am Oberarm **130**, ein elektrisches Feld, welches über die entstehenden Ströme Nerven- und Muskelgewebe reizt.

[0012] Allerdings hat bei der induktiven Magnetstimulation dieser Umweg über das Magnetfeld der Spule auch wichtige technische Probleme zur Folge: Die erforderlichen magnetischen Flussdichten liegen im Bereich von ca. 1 Tesla, so dass während des sehr kurzen magnetischen Stimulationspulses eine extrem hohe elektrische Leistung in die Spule hineingeführt werden muss, um die entsprechenden Feldenergien zu erzeugen. Die erforderlichen elektrischen Leistungen können Werte von mehreren Megawatt und die Ströme mehrere Kiloampere bei Spannungen von einigen Kilovolt erreichen. Daher sind die Pulsquellen technisch aufwändig; weiterhin überhitzt die Spule durch die Stromwärmeverluste sehr schnell, wobei hier zusätzlich beachtet werden muss, dass die Spule als Teil, welches den Körper direkt berühren kann, keinesfalls zu hohe Temperaturen erreichen darf.

[0013] Um dennoch mit vertretbarem technischen Aufwand entsprechende Ströme und Energien für diese Art der Reizung zur Verfügung stellen zu können, arbeiten Magnetstimulationsgeräte derzeit nach dem Prinzip des resonanten Schwingkreises, bei dem ein Kondensator seine Energie in die Spule entlädt. Das Prinzip zur Erzeugung leistungsstarker Pulse für die Spule beruht somit auf einer kontinuierlichen Ladung des Schwingkreis-Kondensators über eine Ladevorrichtung bei relativ geringer Leistung und der schnellen Abgabe des Energieinhalts dieses Kondensators an die Spule zur Erzeugung des kurzen starken Magnetfeld-Pulses.

[0014] Fig. 2 zeigt den prinzipiellen Schaltungsaufbau eines induktiven Stimulationsgerätes, wie er in den ersten Geräten insbesondere zur kontaktlosen Reizung von kortikalen Nervenstrukturen durch den intakten Schädelknochen verwendet wurde (R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5). Die Schaltung nutzt hierzu einen leistungsstarken gedämpften elektrischen Schwingkreis (Resonator) bestehend aus einem Kondensator **220**, einem Dämpfungswiderstand **230**, einer Diode **240**, einem Thyristor **250** und der Spule **260**. Die Ladeschaltung **210** lädt den Kondensator **220** auf eine Spannung von mehreren tausend Volt auf. Der Energieinhalt des Kondensators beträgt dabei einige 100 Joule. Der Thyristor **250** dient als Schalter, der beim Zünden den Kondensator **220** mit der magnetischen Spule **260** verbindet und so den Stromfluss in der Spule beginnen lässt.

[0015] Fig. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung in der Spule entsprechend der Schaltung von Fig. 2. Nach dem Zünden des Thyristors entsteht ein zunächst sinusförmig ansteigender Stromfluss, der ein entsprechend mit der Zeit zunehmendes Magnetfeld erzeugt. Dieses magnetische Feld induziert wiederum infolge seiner zeitlichen Änderung Ringströme im Körpergewebe. Bei Erreichen des Strom-Scheitelwertes hat die phasenversetzte Spulenspannung genau ihren ersten Nulldurchgang. Da ab diesem Zeitpunkt die Spulenspannung ihr Vorzeichen umkehrt, wird nun die Dämpfungsschaltung, bestehend aus dem Widerstand **230** und der Diode **240** aktiv, welche ein Weiterschwingen des Schwingkreises unterbindet. Daher sinkt der Spulenstrom nach Erreichen seines Scheitelwertes langsam wieder auf Null zurück. Die typische Zeitdauer zwischen der Thyristorzündung und dem Erreichen des Stromscheitelwertes liegt bei ca. 50 bis 150 Mikrosekunden. Durch diese Dämpfungsschaltung wird allerdings die gesamte Pulsenergie des Kondensators im Widerstand **230** und in den Spulenleitern der Spule in Wärme umgewandelt.

[0016] Diese bei den ersten Geräten eingesetzte Dämpfungsschaltung, welche die Schwingung ab der ersten abfallenden Stromflanke (nach einem Viertel

der Periodendauer) abdämpft, charakterisiert die sogenannte monophasische Stimulation, da der Spulenstrom während des Pulses nur in eine Richtung fließt, also sein Vorzeichen nicht wechselt. Da bei diesen Geräten die Pulsenergie des magnetischen Feldes bei jedem Puls komplett verloren geht, weisen diese Geräte einen besonders hohen Energieverbrauch auf.

[0017] Diese ersten Geräte waren daher nicht für die sogenannte repetitive Stimulation geeignet, bei der 10 bis 50 Pulse pro Sekunde erforderlich sind. Weiterhin erschweren aber auch die Größe der Geräte und ihr hoher Preis das Erschließen weiterer Einsatzgebiete.

[0018] Ein wichtiges Entwicklungsziel bei den Geräten zur induktiven Magnetstimulation besteht daher in der Reduktion des Energieverbrauches und der Erwärmung der Spule (R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5). Durch experimentelle Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass auch ein ungedämpfter sinusförmiger Zeitverlauf des Spulenstromes und damit auch des magnetischen Feldes bei gleicher Amplitude etwa eine gleichwertige Wirkung hinsichtlich der Nervenreizung zeigt, wie der Stromverlauf von **Fig. 3**.

[0019] **Fig. 4** zeigt eine weitere bekannte prinzipielle Schaltungstopologie für Stimulationsgeräte, wie sie in neueren Gerätegenerationen eingesetzt wird. Dieses Gerät erzeugt sinusförmige Strom- bzw. Feldpulse. Auch hier lädt die Ladeschaltung **210** den Kondensator **220** auf eine Spannung von mehreren tausend Volt auf. Der Thyristor **410** dient wieder als Schalter, der beim Zünden den Kondensator **220** mit der magnetischen Spule **260** verbindet. Im Gegensatz zur monophasischen Stimulatorschaltung von **Fig. 2** wird bei dieser Schaltung jedoch keine Dämpfungsschaltung eingesetzt, so dass auch nach dem ersten Nulldurchgang der Spulenspannung der Schwingkreis weiter schwingt.

[0020] **Fig. 5** zeigt den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung in der Spule entsprechend der Schaltung von **Fig. 4**. Nach dem Zünden des Thyristors entsteht ein sinusförmig ansteigender Stromfluss, der ein entsprechend mit der Zeit zunehmendes Magnetfeld erzeugt. Nach einer halben Sinusschwingung, zum Zeitpunkt $T/2$ wechselt der Strom im Schwingkreis seine Polarität. Zu diesem Zeitpunkt übernimmt die Diode **420** die Leitung des Spulenstromes bis eine volle Sinusschwingung zum Zeitpunkt T erreicht wird. Eine erneute Umkehr der Stromrichtung und damit ein Weiterschwingen wird unterbunden, da der Thyristor **410** zu diesem Zeitpunkt T nicht mehr leitet. Wegen der Umkehr der Stromrichtung während eines Pulses zum Zeitpunkt $T/2$ wird diese Art der Stimula-

tion allgemein als biphasische Magnetstimulation bezeichnet.

[0021] Durch das Schaltungsprinzip gemäß **Fig. 4** kann erreicht werden, dass ein großer Teil der für die Spule **260** aufgewendeten Feldenergie wieder in den Kondensator **220** zurückgeführt werden kann und so die Verluste sowohl in der Pulsquelle als auch in der Spule **260** reduziert werden. Die Verluste der Schaltung nach **Fig. 4** ergeben sich hauptsächlich über die ohmschen Widerstände der beteiligten Schaltungskomponenten und ihrer Verbindungskabel.

[0022] Da die für eine erfolgreiche Reizung erforderliche Stromamplitude jedoch gegenüber den Geräten mit monophasischer Pulsform etwa unverändert ist, bleiben auch die nötige Spannung und der Energieinhalt des Kondensators **220** nahezu gleich, wie bei monophasischen Geräten.

[0023] **Fig. 6** zeigt eine Abwandlung der Schaltungstopologie von **Fig. 4** da, wie sie ebenfalls in neueren Geräten eingesetzt wird (R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5). Auch hier lädt die Ladeschaltung **210** den Kondensator **220** auf eine positive Spannung von mehreren tausend Volt auf. Der Thyristor **610** dient als ein erster Schalter, der beim Zünden den Kondensator **220** mit der magnetischen Spule **260** verbindet. Der Strom durch die Spule bzw. den Thyristor **610** erreicht erstmalig nach einer viertelten Sinuswelle einen Nulldurchgang des Stromes. Wenn zu diesem Zeitpunkt kein Steuersignal an den Thyristoren anliegt, stoppt damit der Schwingkreis; der Kondensator ist zu diesem Zeitpunkt negativ geladen. Die im Kondensator gespeicherte Energie entspricht dabei fast der Energie zum Startzeitpunkt des Pulses und ist nur um die entsprechenden Verluste der Schaltung reduziert. Nun kann der zweite Thyristor **620** gezündet werden und damit einen Puls mit inversem Spannungsverlauf gegenüber dem ersten Puls erzeugen. Insbesondere kann die Zeitdauer zwischen zweien solcher Pulse fast beliebig kurz gewählt werden, da durch die Verteilung der zwei Pulse auf zwei Thyristoren keine Erholzeiten der Thyristoren beachtet werden müssen.

[0024] **Fig. 7** zeigt den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung in der Spule entsprechend der Schaltung von **Fig. 6**. Nach dem Zünden des Thyristors **610** entsteht ein sinusförmig ansteigender Stromfluss, der ein entsprechend mit der Zeit zunehmendes Magnetfeld erzeugt. Nach einer halben Sinusschwingung, zum Zeitpunkt $T/2$, erreicht der Strom im Schwingkreis seine erste Nullstelle. Falls zu diesem Zeitpunkt der zweite Thyristor **620** nicht gezündet wird, ist eine Umkehr der Stromrichtung nicht möglich, so dass ein Weiterschwingen bereits nach einer Halbwelle unterbunden wird. Eine Zündung des Thyristors **620** zu einem späteren Zeitpunkt erzeugt in der Spule einen

weiteren Halbwellenpuls mit umgekehrter Strom- und Magnetfeldrichtung. Alternativ kann aber auch direkt bei Erreichen der ersten Strom-Nullstelle der zweite Thyristor **620** gezündet werden, so dass eine volle Sinusschwingung, ähnlich wie bei **Fig. 5**, entsteht. In jedem Fall wird aber auch bei dieser Schaltung die Feldenergie der Spule zu einem großen Teil wieder in den Kondensator zurückgeführt.

[0025] Je nach Wahl des Endzeitpunktes des Pulses unterscheidet man daher bezüglich der Pulsformen dieser induktiven Stimulationsgeräte gemäß **Fig. 4** und **Fig. 6** zwischen einer biphasischen Vollwellen-Stimulation (Dauer des Strompulses eine volle Sinusperiode) und einer biphasischen Halbwellen-Stimulation. Nachteilig bei der biphasischen Halbwellen-Stimulation ist allerdings, dass nach dem Puls die Spannungsrichtung im Kondensator gegenüber dem Zustand vor der Pulsabgabe invertiert ist, wodurch die entsprechende Ladeschaltung aufwändiger wird. Weiterhin wechselt bei der biphasischen Halbwellenstimulation auch die Richtung des magnetischen Feldes, so dass aufeinanderfolgende Pulse leicht unterschiedliche Wirkungen im Gewebe erzeugen.

[0026] Die Energierückgewinnung entsprechend den Schaltungen von **Fig. 4** und **Fig. 6** ermöglicht eine Reduktion der bei jedem Puls verlorenen Energie und damit auch der Stromwärmeverluste in Spule und Leistungselektronik. Dies ermöglicht auch den Bau von repetitiven induktiven Stimulationsgeräten, welche bis zu 100 Pulse pro Sekunde abgeben können. Allerdings ist speziell für diesen repetitiven Betrieb der Energieverbrauch und die Spulenerwärmung immer noch erheblich. Insbesondere die Spulenerwärmung begründet sich durch die sehr hohen notwendigen Spulenströme im Kiloampere-Bereich.

[0027] Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Energieverluste kann über die Senkung der Stromwärmeverluste der Spule erreicht werden (R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5). Dies geschieht durch Erhöhung des wirksamen Leiterquerschnitts, wobei einerseits ein dickeres Leitermaterial verwendet werden kann und andererseits der Leiter durch Verwendung von Hochfrequenzlitze filamentiert werden kann, so dass die Stromverdrängungseffekte im Leiter reduziert werden. Allerdings ist der elektrische Widerstand der Spule aus Gewichtsgründen nicht beliebig reduzierbar

[0028] Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs des Reizpulses stellen noch immer die drei genannten Wellentypen, die gedämpften monophasischen Pulse, die biphasische Halbwellen-Pulse und die biphasischen Vollwellen-Pulse die einzigen Pulsformen dar, die bei kommerziellen induktiven Magnetstimulationsgeräten eingesetzt werden. Alle diese Wellenformen basieren letztlich auf dem Prinzip des resonanten

Schwingkreises, bei dem die Spule die Induktivität darstellt.

[0029] Daher haben die bisher eingesetzten Geräte zusätzlich den großen Nachteil, dass die Pulsdauer von der Induktivität der Spule abhängt. Insbesondere weisen beispielsweise kleine Spulen oft konstruktionsbedingt eine verringerte Induktivität als große Spulen auf; daher konnte bei bisherigen Systemen die Pulsdauer bei Einsatz verschiedener Spulen nicht konstant in einem optimalen Bereich gehalten werden.

[0030] Zeitweise Versuche mit anderen Pulsformen, wie in Peterchev et al. 2008 mit einer Rechteckform (A. V. Peterchev, R. Jalinous, and S. H. Lisanby: A Transcranial Magnetic Stimulator Inducing Near-Rectangular Pulses With Controllable Pulse Width (cTMS), IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 55, no. 1, 2008) sind entweder energetisch sehr ineffektiv, oder sie führen zu äußerst aufwändigen technischen Aufbauten und sind somit zu kostspielig für eine kommerzielle technische Realisierung.

[0031] Bei allen Anwendungen besteht der Nachteil der induktiven Magnetstimulation daher immer noch im hohen Energieverbrauch, der sehr schnellen Überhitzung der Spule und dem hohen Gewicht der Lade- und Pulserzeugungselektronik.

[0032] Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass der zeitliche Verlauf des Reizpulses nicht flexibel an bestimmte Nervenzell- oder Axontypen oder an andere Erfordernisse individuell angepasst werden kann. Somit können vorhandene Reizgeräte weder selektiv bestimmte Zelltypen ansprechen, noch über unterschiedliche applizierte Pulsformen Rückschlüsse auf Zelltyp oder -erkrankung zulassen.

ÜBERSICHT ÜBER DIE ERFINDUNG

[0033] Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung zur Erzeugung fein gestufter Spannungs- und Stromverläufe zur Erzeugung optimierter elektrischer Pulse bereitzustellen, mit dessen Hilfe die genannten Nachteile vermieden werden, wobei die Pulse über eine Stimulationsspule eine Reizung von Nerven- und/oder Muskelzellen bewirken.

[0034] Diese Aufgabe wird insbesondere gelöst durch eine Vorrichtung gemäß Anspruch 1. Vorteilhaft Ausgestaltungen der Erfindung sind jeweils Gegenstand der Unteransprüche sowie der Figurenbeschreibung

[0035] Gemäss einem Aspekt der Erfindung wird eine modular aufgebaute Pulsquelle vorgeschlagen, bestehend aus einem Hauptmodul und mindestens einem, vorzugsweise mehreren zusätzlichen Modu-

len, die sämtlich seriell im Sinne von Zweipolen miteinander verschaltet sind. Die Module weisen jeweils eine Energiespeichereinrichtung, vorzugsweise gebildet durch einen Kondensator auf. Die Speichereinrichtung des Hauptmoduls wird anfänglich durch eine Ladeschaltung aufgeladen. An den beiden Endpunkten der Serienschaltung ist eine Stimulationsspule verschaltet, die aufgrund eines von der Modulkette ausgehenden Spannungspulses ein Magnetfeld erzeugt, welches wiederum einen induzierten elektrischen Puls bzw. ein entsprechendes elektrisches Feld bewirkt. Die Module sind vorzugsweise als Vierquadrantenmodule oder Vierquadrantenmodule ausgeführt. Die Schalteinrichtungen der Module werden von einer Controller-Einrichtung gesteuert. Vorzugsweise weisen die Module neben einem aktiven Betrieb, bei dem die Spannung der entsprechenden Speichereinrichtung zum Spannungspfad der Serienschaltung beiträgt, einen Bypass-Betrieb auf, bei dem das Modul elektrisch überbrückt wird und nicht zum Spannungspfad beiträgt sowie vorzugsweise einen invertierten Betrieb auf, bei dem der Spannungsbeitrag invertiert auf den Spannungspfad wirkt. Vorzugsweise steuert die Controller-Einrichtung die im aktiven Zustand wirkenden Spannungsbeiträge derart, dass diese sich gemäß Zweierpotenzen voneinander unterscheiden. Damit ist es möglich mit einer relativ geringen Anzahl von Modulen eine große Anzahl von Spannungsstufen zu erzeugen, die dann auf die gekoppelte Stimulationsspule einwirken und somit über die Zeit den gewünschten Spannungsverlauf bewirken. Die Erfindung basiert einerseits auf der Erkenntnis, dass bei einer verbesserten Anpassung des Zeitverlaufes der im Gewebe induzierten Felder und Ströme an die dynamischen Ladungstransportphänomene der Nerven- oder Muskelfasern die benötigte Feldstärke und Feldenergie zur induktiven Reizung dieser Fasern reduziert werden kann.

[0036] Die Erfindung basiert weiterhin auf der Erkenntnis, dass über eine Serienschaltung aus mehreren zweipoligen Modulen, welche jeweils ein oder mehrere Energiespeicherelemente (wie beispielsweise einen Kondensator) enthalten, durch entsprechende Steuerung der Konfigurationen der Module ein fein gestufter Spannungsverlauf eines Pulses an den Enden der Serienschaltung erzeugt werden kann. Entsprechend kann eine Stimulationsspule für die induktive Nervenreizung mit den Enden der Serienschaltung verbunden werden, um so Pulse mit frei konfigurierbarem Verlauf der induzierten Feldstärke erzeugen zu können.

[0037] Die zweipoligen Module können vorzugsweise als Vierquadranten-Module ausgeführt sein. Damit kann jedes Modul die Spannung des Energiespeicherelementes unabhängig von der Stromrichtung positiv oder negativ an seine beiden Klemmen schalten. Weiterhin können diese Module noch einen Bypass-Zustand einnehmen, bei dem das Mo-

dul seine beiden Klemmen elektrisch direkt miteinander verbindet, wobei der Energiespeicher weder Ladung abgibt noch aufnimmt. Weiterhin enthält die Serienschaltung noch mindestens ein Hauptmodul, welches ebenfalls jeweils mindestens ein Energiespeicherelement enthält. Dieses Hauptmodul kann auch als Vierquadranten-Modul oder als Zweiquadranten-Modul ausgeführt sein. Im letzteren Fall kann das Modul nur die Zustände Bypass oder positive Spannung an den Klemmen schalten. Das Hauptmodul enthält ein Energiespeicherelement, welches vorzugsweise mindestens die Energie für den abzugehenden Puls speichern kann. Weiterhin wird dieses Hauptmodul von einer Ladeschaltung versorgt um die benötigte so Energie in das Energiespeicherelement zu laden. Die Speicherkapazitäten der Energiespeicherelemente der anderen Vierquadranten-Module können wesentlich kleiner sein, da diese Energiespeicherelemente während der Pulsabgabe über den Strom der gesamten Serienschaltung gezielt ent- oder geladen werden können. Allerdings können die Energiespeicherelemente der anderen Vierquadranten-Module ebenfalls von einer Ladeschaltung vor der Abgabe des Pulses vorgeladen werden. Während der Pulsabgabe selbst findet allerdings keine Nennenswerte Ladung des Hauptmoduls oder der anderen Vierquadranten-Module statt.

[0038] Die Spannungen der Energiespeicherelemente der einzelnen Module weisen dabei unterschiedliche Werte auf, so dass eine Serienschaltung von Einzelmodulen über entsprechendes Aktivieren, Deaktivieren und Umpolen der Energiespeicherelemente eine sehr fein gestufte Anpassung des gewünschten Spannungsverlaufs während der Pulsabgabe ermöglicht. Vorzugsweise erfolgt die Abstufung der einzelnen Spannungen der Energiespeicherelemente der Module nach 2er-Potenzen, aber auch andere Abstufungen sind möglich. Das Energiespeicherelement des versorgten Hauptmoduls stellt dabei die höchste Spannungsstufe dar.

[0039] Entsprechend des Stromes durch die Serienschaltung von Modulen nehmen dabei die Energiespeicherelemente jedes Moduls während eines Pulses entsprechend ihres aktuell geschalteten Zustandes Ladung auf, geben Ladung ab oder erhalten ihren aktuellen Ladezustand (Bypass-Zustand). Die entsprechend gewählte Abstufung der Spannungen der Module ermöglicht es, dass es für jede auszugehende Spannungsstufe immer mindestens zwei Modulkonfigurationen gibt, so dass die Energiespeicherelemente der jeweiligen Module – ausgenommen das Energiespeicherelement des Hauptmoduls – wahlweise ge- oder entladen werden können.

[0040] Damit kann eine Pulsquelle aus einer Hintereinanderschaltung von Einzelmodulen aufgebaut werden. Wenn das Energiespeicherelement des Hauptmoduls auf die Sollspannung geladen ist und

die Energiespeicherelemente der weiteren Vierquadranten-Module vorzugsweise auch auf deren Sollspannungen geladen sind, kann ein gewünschter Spannungsverlauf in feinen Stufen durch eine zeitliche Abfolge von Modulkonfigurationen erzeugt werden. Für jede Modulkonfiguration wird dabei jedes einzelne Modul der Serienschaltung entsprechend zugeschaltet, umgepolt oder abgeschaltet. Da sich während der Abgabe eines Pulses durch den damit verbundenen Spulenstrom die Ladungszustände (und damit auch die Spannungen) der Energiespeicherelemente verändern, wird während des Pulses in kurzer Folge ständig die Konfiguration der Module verändert, so dass Modul-Kondensatoren mit zu niedriger Spannung wieder nachgeladen und Modul-Kondensatoren mit zu hoher wieder entladen werden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0041] Die voranstehenden und weitere Ziele, Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden, detaillierten Beschreibung in Zusammenhang mit den beigegeführten Zeichnungen deutlicher, wobei:

[0042] Fig. 1 eine Pulsquelle, die über ein Kabel angekoppelte Spule und die zu reizende Gewebsstruktur (menschlicher Oberarm) zeigt;

[0043] Fig. 2 den prinzipiellen Aufbau eines monophasischen Leistungskreises zeigt;

[0044] Fig. 3 den Spannungs- und Stromverlauf in der Spule eines monophasischen Stimulators während eines Pulses zeigt;

[0045] Fig. 4 den prinzipiellen Aufbau eines Leistungskreises zur Erzeugung von Sinus-Vollwellen zeigt;

[0046] Fig. 5 den Spannungs- und Stromverlauf eines Vollwellen-Stimulators in der Spule während eines Pulses zeigt;

[0047] Fig. 6 den prinzipiellen Aufbau eines Leistungskreises zur Erzeugung von Sinus-Halbwellen zeigt;

[0048] Fig. 7 den Spannungs- und Stromverlauf eines Halbwellen-Stimulators in der Spule während eines Pulses zeigt;

[0049] Fig. 8 beispielhaft einen optimierten Zeitverlauf des erforderlichen Stromes an einer Zellmembran (und damit auch des Verlaufes der Spulenspannung) während eines Reizpulses, wie er sich als optimiertes Resultat einer Nervenzellmodellierung ergibt;

[0050] Fig. 9 den möglichen Aufbau eines Vierquadranten-Moduls und eines Zweiquadranten-Moduls

zeigt, wie er bei der vorliegenden Erfindung zum Einsatz kommen kann;

[0051] Fig. 10a, b den prinzipiellen Aufbau einer Pulsquelle zeigt, gemäß bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung bestehend jeweils aus einem zu ladenden Modul und einer Kette von Vierquadranten-Modulen;

[0052] Fig. 11 die Näherung eines gewünschten Zeitverlaufes der Spannung eines Stimulationspulses durch entsprechend feine Stufen zeigt, wie sie erfindungsgemäß erzeugt werden können;

[0053] Fig. 12 eine erfindungsgemäße Pulsquellenschaltung, bestehend aus 4 Modulen in drei Darstellungsweisen zeigt;

[0054] Fig. 13 mögliche Spannungen aktivierter Module und die zugehörigen Ausgangsspannungen für die Pulsquellenschaltung, bestehend aus 4 Modulen gemäß Fig. 12 zeigt;

[0055] Fig. 14 Pulsquellen-Schaltung mit insgesamt zwei Modulen zur Erzeugung und Zeitverlauf einer eingestellten Spannungsstufe.

[0056] Fig. 15 Pulsquellen-Schaltung mit insgesamt drei Modulen zur Erzeugung und Zeitverlauf einer eingestellten Spannungsstufe.

[0057] In den Zeichnungen sollen gleiche Bezugszeichen gleiche Teile, Bauteile und Anordnungen bezeichnen.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0058] Die Erfindung basiert einerseits auf der Erkenntnis, dass sich bestimmte technisch-physikalische Größen, die für die Reizung von Nerven- und Muskelgewebe erforderlich sind bei der induktiven Stimulation deutlich reduzieren lassen, wenn der zeitliche Verlauf des im Körper induzierten elektrischen Feldes und den dadurch verursachten Strömen dem dynamischen Verhalten der Ionentransportvorgänge in der Nervenzellmembran angepasst wird. Diese Größen können beispielsweise die benötigte Feldenergie, die Spulenverlustenergie, die erforderliche Spulenstromstärke, die erforderliche Spulenspannung, die maximale Steilheit der Spulenspannung oder des Spulenstromes oder der akustische Artefakt der Spule sein. Daher ist es vorteilhaft, wenn die entsprechenden induktiven Reizgeräte unterschiedliche zeitliche Verlaufsformen von Strom- und Spannung bei der Pulsabgabe zur Verfügung stellen können, um dadurch die Bedingungen für verschiedene Optimierungskriterien erfüllen zu können.

[0059] Fig. 8 zeigt beispielhaft einen sehr günstigen zeitlichen Verlauf des Stromes für die Erregung einer Nervenzelle, der es ermöglicht mit einer geringen Amplitude oder Reizenergie ein Aktionspotential in Axonen auszulösen. Insbesondere kann die in Fig. 8 erkennbare erste dem eigentlichen positiven Stimulationspuls vorgelagerte negative Teil-Schwingung mit kleiner Amplitude durch ihre Anregung dynamischer Prozesse auf Membranebene die für eine Reizung erforderliche Amplitude des benötigten Stromes deutlich senken. Dies bedeutet beispielsweise, dass wenn die zugehörige Leistungselektronik einen zeitlichen Verlauf des Pulses so erzeugt, dass die Spulenspannung und damit auch das im Körper induzierte elektrische Feld einen Verlauf aufweisen, wie er in Fig. 8 dargestellt ist, die benötigte Reizenergie reduziert werden kann. Dadurch kann wiederum die entsprechende Pulsquelle deutlich verkleinert und zu geringeren Kosten produziert werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Spulenverluste deutlich reduziert werden können, so dass Serien von Pulsen in kurzer Folge (sog. repetitive Stimulation) über deutlich längere Zeiträume abgegeben werden können.

[0060] Die Erkenntnis bezüglich der notwendigen zeitlichen Verlaufsformen des Feldes kann beispielsweise auf einer mathematischen Modellierung der Nervenzellen basieren, wie sie erstmalig von Hodgkin und Huxley aufgestellt wurde (A. L. Hodgkin, A. F. Huxley: A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *Journal of Physiology*. 117, 1952, S. 500–544). Ein solches Modell basiert auf einem Satz nichtlinearer Differentialgleichungen und simuliert das elektrische Verhalten von Nervenzellen, insbesondere das Verhalten kurzer Membranabschnitte von Axonen. Mit diesem Modell kann beispielsweise die Reaktion eines Axons auf von außen einwirkende elektrische Ströme nachvollzogen werden. Daher können hiermit die erforderlichen Reizströme bei verschiedenen Zeitverläufen der Pulse, die erforderlich sind, um ein Aktionspotential in der Nervenzelle auszulösen rechnerisch bestimmt werden. Eine solche Betrachtung legt allerdings auch nahe, dass zur Erzeugung eines solchen gewünschten Zeitverlaufes für die elektrische Feldstärke im Gewebe eine pulsweitenmodulierte Spannungsquelle, wie sie üblicherweise als Stromrichter in der Energietechnik zur Anwendung kommt, keineswegs geeignet ist. Dies liegt daran, dass eine pulsweitenmodulierte Ansteuerung der Spule im Körpergewebe zu einem elektrischen Feldverlauf mit nahezu identischem (auch pulsweitenmodulierten) Verlauf führen würde. Ein solcher Verlauf würde aber – bedingt durch die hohen Feldstärkespitzen – eine völlig andere Wirkung entfalten als ein kontinuierlicher oder feingestufteter Zeitverlauf.

[0061] Weiterhin liegt der Erfindung die Erkenntnis zu Grunde, dass eine solche Pulsquelle hoher Leis-

tung bei gleichzeitig geringen Verlusten durch eine Serienschaltung von gesteuerten Zweipolen aufgebaut werden kann, wobei die Zweipole jeweils elektrische Energiespeicherelemente, wie beispielsweise Kondensatoren enthalten und wobei die Spannungen dieser Energiespeicherelemente in einer bestimmten Art und Weise abgestimmt sein muss. Die Zweipole sind als Vierquadranten-Module ausgeführt und können die jeweiligen Energiespeicherelemente entweder direkt oder invertiert mit ihren beiden Anschlüssen verbinden. Weiterhin können die Vierquadranten-Module aber auch einen sogenannten Bypass-Zustand einnehmen, bei dem ein direkter elektrischer Strompfad zwischen den beiden Anschlüssen geschaltet wird, gleichzeitig aber das Energiespeicherelement weder geladen noch entladen wird. Damit liefert jedes Vierquadranten-Modul einer solchen Serienschaltung einen positiven oder negativen Spannungsanteil entsprechend der Spannung seines Energiespeicherelementes, oder es schaltet nur den entsprechenden Strompfad zwischen seinen Anschlüssen durch und liefert keinen Beitrag zur Gesamtspannung.

[0062] Insbesondere kann diese Pulsquelle aus einem (bzw. mehreren in Serie geschalteten) versorgten Hauptmodul bestehen, welches wiederum in Serie mit mindestens einem der genannten Vierquadranten-Module liegt. Insbesondere vor Abgabe des Pulses wird jeweils das Energiespeicherelement des Hauptmoduls von einer Spannungsquelle geladen. Das Energiespeicherelement des Hauptmoduls speichert dabei vorzugsweise die elektrische Energie für die Erzeugung des Pulses (beispielsweise in der Stimulationsspule). Damit kann die vergleichsweise hohe elektrische Leistung, die während des Pulses mit der Stimulationsspule ausgetauscht wird, über das Energiespeicherelement des Hauptmoduls zur Verfügung gestellt werden, ohne dass die entsprechende Spannungsversorgung einen nennenswerten Beitrag leisten muss. Vorzugsweise dürfen die Energiespeicherelemente der Vierquadranten-Module einen deutlich geringen Energieinhalt aufweisen, da sie über die Serienschaltung aller Module während der Pulsabgabe geladen und entladen werden können. Weiterhin können auch die Energiespeicherelemente der Vierquadranten-Module vor der Abgabe des Pulses von einer entsprechenden Stromversorgung aufgeladen werden.

[0063] Sowohl das Hauptmodul als auch die Vierquadranten-Module stellen dabei elektrische Zweipole dar, die gemäß einem Aspekt der Erfindung in Serie geschaltet sind. Die beiden Enden dieser Serienschaltung bilden damit den Ausgang der Pulsquelle und sind entsprechend mit der Stimulationsspule verbunden. Eine solche Schaltung ist damit in der Lage einen nahezu beliebigen, feingestufteten Zeitverlauf einer Spannung abzugeben.

[0064] Typische Stimulationspulse zur Reizung von menschlichen Axonen haben eine Pulsdauer von 50–300µs. Bei repetitiver Reizung werden Pulse mit einer Wiederhol-Rate von 30–100 Hz abgegeben. Daher ist ein Nachladen des Energiespeicherelementes des Hauptmoduls in den Pausen zwischen zwei Pulsen mit vergleichsweise kleiner Leistung möglich.

[0065] Die in Serie geschalteten Vierquadranten-Module können dabei wie die in **Fig. 9** dargestellten Module **930, 940** aufgebaut sein. Sie werden als Vierquadranten-Module bezeichnet, weil sowohl der Strom als auch die Spannung an den beiden Anschlüssen **910, 911** beliebig positiv oder negativ sein kann. Anstelle der dargestellten Transistoren **901** bis **904** können auch andere elektrisch schaltende Bauelemente zum Einsatz kommen. Je zwei der in Serie geschalteten Transistoren **901** und **902** bzw. **903** und **904** können auch als eine sogenannte Halbbrücke betrachtet werden. Parallel zu diesen Transistoren kann jeweils eine Diode **905** bis **908** geschaltet sein, die auch die integrierte Body-Diode der jeweiligen Transistoren sein kann. Im Prinzip kann für die schaltenden Elemente jede Art von steuerbarem Schalter verwendet werden. Entsprechend kann die Vollbrücke **940** auch durch vier Schalter dargestellt werden. Die Transistoren bzw. Schalter können die Ausgangsklemmen **910** und **911** mit dem Kondensator **909** elektrisch verbinden. Insbesondere können diese Einzelmodule über ihre Schalter in die folgenden vier Zustände geschaltet werden:

- Vorgabe einer positiven Klemmenspannung in Bezug auf die beiden Klemmen **910** und **911** bei beliebiger Stromrichtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter **901** und **904**;
- Vorgabe einer negativen Klemmenspannung in Bezug auf die beiden Klemmen **910** und **911** bei beliebiger Stromrichtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter **902** und **903**;
- Bypasszustand (d. h. keine Energieaufnahme oder -abgabe durch das Einzelmodul), freier Stromfluss in beliebiger Richtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter **901** und **903** oder der Transistorschalter **902** und **904**;
- Erzwingen einer Energieaufnahme durch das Einzelmodul unter Aufzwingen des Spannungsniveaus; wenn beispielsweise alle Transistorschalter gesperrt sind und der Betrag der von außen angelegten Klemmenspannung die Spannung des Kondensators überschreitet.

[0066] Das Hauptmodul der Pulsquelle kann entweder ebenfalls wie ein Vierquadranten-Modul aufgebaut sein, wobei es zusätzlich eine elektrische Energieversorgung zum Laden des Kondensators benötigt. Weiterhin können auch mehrere solcher Hauptmodule mit ihren jeweiligen Energiespeicherelemen-

ten in Serie geschaltet werden. Alternativ kann das Hauptmodul aber auch als ein Zweiquadranten-Modul ausgeführt sein, so dass es – bei beliebiger Stromrichtung – nur positive Spannungen abgeben kann.

[0067] Die wesentlichen Schaltzustände eines solchen Zweiquadranten-Moduls sind dabei: Abgabe der vollen Spannung des Energiespeicherelementes oder Bypasszustand. **Fig. 9** zeigt ein solches Modul **950**, welches aus zwei Schaltern, **923, 924** und einem Kondensator **929** als Energiespeicherelement besteht. Die Spannung wird über die Klemmen **920, 921** abgegeben. Bei Verwendung eines Zweiquadranten-Moduls für das Hauptmodul ist allerdings der Bereich der Spannung, welche die Pulsquelle während des Pulsverlaufes abgeben kann stärker eingeschränkt, als bei Verwendung eines Vierquadranten-Moduls.

[0068] Alle Schaltelemente der Module können beispielsweise als Transistoren (beispielsweise MOS-FET oder auch IGBT) oder andere Halbleiterschalter ausgeführt und durch Parallelisierung in der Stromtragfähigkeit verbessert werden.

[0069] **Fig. 10a** zeigt die Schaltung einer möglichen Ausführungsform der Pulsquelle. Eine Ladeschaltung **1010** ist hierbei direkt verbunden mit dem Hauptmodul **1020**. In Serie hierzu liegen n Vierquadranten-Module **1030, 1040, 1050**, wobei n eine beliebige ganze Zahl größer oder gleich 1 sein kann. Die Spannungen der Energiespeicherelemente können dabei vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen abgestuft sein. Je mehr Vierquadranten-Module für die Pulsquelle verwendet werden (d.h. je größer n ist), desto mehr Spannungsstufen können eingestellt werden. Die Stimulationsspule **1005** wird direkt mit den beiden Ausgangsklemmen **1060, 1070** der Pulsquelle verbunden. Das versorgte Hauptmodul beinhaltet ein Energiespeicherelement dessen Kapazität vorzugsweise groß genug ist, um die benötigte Energie des Pulses abzugeben. Dieses Energiespeicherelement wird vor der Pulsabgabe von einer Ladeschaltung **1010** geladen. Dabei kann die Ladeleistung im Vergleich zur elektrischen Leistung des Pulses klein sein, so dass der Ladevorgang diese Energiespeicherelemente deutlich länger dauern darf, als der Puls selbst. Das versorgte Hauptmodul kann dabei – wie in **Fig. 10** dargestellt, auch ein Vierquadranten-Modul sein. Alternativ kann hier auch ein Zweiquadranten-Modul **950** gemäß **Fig. 9** eingesetzt werden. Weiterhin können die Energiespeicherelemente der n Vierquadrantenmodule ebenfalls von einer Ladeschaltung vor der Abgabe des Pulses vorge-laden werden. Dieser Vorgang benötigt vergleichsweise sehr wenig Energie, da die Kapazitäten der n Vierquadranten-Module vorzugsweise sehr viel kleiner sind, als die Kapazität des Hauptmoduls.

[0070] Außerdem können an Stelle der dargestellten Ausführungsformen für das Hauptmodul auch alternative Schaltungstopologien zum Einsatz kommen, deren wesentliche Eigenschaft darin besteht, einen Energiespeicher wahlweise direkt mit einer nachfolgenden Kette von Vierquadranten-Modulen **1030**, **1040**, **1050** zu verbinden oder eine Bypassverbindung der Kette von Vierquadranten-Modulen direkt zu einer Ausgangsklemme **1060** herzustellen. Die Ladeschaltung kann über ihre Klemmen **1080** beispielsweise direkt mit dem Stromnetz verbunden sein. Während der Pulsabgabe können die Energiespeicherelemente der Vierquadranten-Module durch entsprechendes direktes oder invertiertes Schalten in den Strompfad nachgeladen werden.

[0071] Die Stimulationsspule **1005** zur Nervenreizung wird mit den beiden Ausgangsklemmen **1060**, **1070** der Pulsquelle verbunden. Durch entsprechende Wahl der Schaltzustände jedes einzelnen Vierquadranten-Moduls **1030**, **1040**, **1050** und des versorgten Hauptmoduls **1020** kann an den Ausgangsklemmen der Pulsquelle ein gewünschter Momentanwert der Spannung eingestellt werden. Durch eine schnelle zeitliche Abfolge von solchen eingestellten Momentanwerten kann die Pulsquelle daher einen gewünschten zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung in feinen Stufen darstellen. Vorzugsweise ist die Spannung des Energiespeicherelementes des versorgten Hauptmoduls höher als die Spannungen der Energiespeicherelemente der Vierquadranten-Module; weiterhin sind die Spannungen der Energiespeicherelemente aller Module untereinander abgestuft, beispielsweise in Form von Zweierpotenzen, so wie in **Fig. 10** dargestellt, wobei das Hauptmodul die höchste Spannungsstufe darstellt. Die Energiespeicherelemente können – bis auf das Energiespeicherelement des Hauptmoduls – durch entsprechende Umpolvorgänge während des Pulses jeweils ge- oder entladen werden, so dass ihre jeweilige Spannung in kleinen Grenzen kontrolliert werden kann. Diese Umpolvorgänge können durch die jeweiligen Schaltzustände ausgelöst werden. Der Strom, welcher dabei die Energiespeicherelemente jeweils lädt oder entlädt, entspricht dabei dem Strom der durch die gesamte Serienschaltung von Modulen und die Stimulationsspule fließt. Dieser Strom kann – entsprechend der Induktivität der Spule – während der Abgabe eines Pulses seine Polarität wechseln.

[0072] Während der Abgabe eines Pulses kann sich – bedingt durch den Energieverbrauch im Spulenstromkreis – die Spannung des Energiespeicherelementes des versorgten Hauptmoduls verändern. Entsprechend werden vorzugsweise die Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente der Vierquadranten-Module ebenfalls an die veränderte Spannung des Energiespeicherelementes des Hauptmoduls angepasst, um so die gewünschte Abstufung der einzelnen Spannungen aufrecht zu erhalten.

[0073] **Fig. 10b** zeigt eine weitere Ausführungsform der Pulsquelle, bei die Energiespeicherelemente sämtlicher Module über entsprechende Spannungsquellen **1012**, **1014**, **1016**, **1018** (hier beispielhaft gezeigt als potentialgetrennte DC-DC-Wandler) vor der Abgabe des Pulses aufgeladen werden. Die Verschaltung der Module und des Leistungskreises sind dabei identisch zu der von **Fig. 10a**.

[0074] Die einzelnen Schalter der Module werden über eine entsprechende Steuerung bzw. Controller-Einrichtung kontrolliert. Dabei kann diese Steuerung die aktuellen Spannungs- bzw. Ladezustände der Energiespeicherelemente der Module über eine Messung erfassen. Alternativ kann die Steuerung aber auch über eine Simulation des Pulsverlaufes die zu erwartenden Ladezustände der Energiespeicherelemente während der Pulsabgabe vorausberechnen und damit indirekt erfassen. Dadurch können die Spannungen der Energiespeicherelemente indirekt bestimmt und so die erforderlichen Schaltzustände der Module während des Pulses ermittelt werden.

[0075] **Fig. 11** zeigt beispielhaft den fein gestuften Spannungsverlauf eines Stimulationspulses, wie er von einer erfindungsgemäßen Pulsquelle an eine Stimulationsspule für die induktive Nervenreizung abgegeben werden könnte. Der dargestellte Spannungsverlauf hat im vorliegenden Beispiel ausschließlich positive Spannungswerte. Für die Ausgabe eines solchen Spannungsverlaufes genügt es, wenn das versorgte Hauptmodul der Pulsquelle ebenfalls nur positive Spannungen erzeugen kann. In diesem Fall genügt es daher, wenn das versorgte Hauptmodul als Zweiquadranten-Modul ausgeführt ist. Im vorliegenden Fall wird der dargestellte Spannungsverlauf durch 32 Stufen dargestellt. Hierfür werden ein Hauptmodul und 7 Vierquadranten-Module benötigt.

[0076] Durch Hinzufügen eines zusätzlichen (z.B. längsgeregelten) analogen Moduls in die Serienschaltung von Modulen kann die Pulsquelle auch so modifiziert werden, dass sie anstelle eines gestuften Spannungsverlaufes kontinuierliche Ausgangsspannungen erzeugt kann. Der Spannungshub eines solchen Analogmoduls muss nur unwesentlich größer sein, als der Spannungswert des Moduls mit der kleinsten Spannung. Solche vergleichsweise kleinen Spannungen lassen sich auch bei hohen Strömen relativ einfach über Leistungstransistoren längsregeln. Im Gegensatz dazu wäre die Erzeugung eines derart energiereichen Pulses, wie er für die Magnetstimulation benötigt wird, durch eine reine Längsregelung technisch außerordentlich aufwändig, da hier extrem große Leistungen von entsprechenden Transistoren gesteuert werden müssten und ein Parallelschalten von Transistoren bei hohen Leistungen und Spannungen kaum möglich ist.

[0077] Alternativ können auch Filterschaltungen zur Anwendung kommen, um die Spannungsstufen zu glätten.

Betrachtung einer Modulkette:

[0078] Fig. 12 zeigt ein solches System bestehend aus vier Modulen, welche jeweils als Vierquadranten-Module ausgelegt sind. Dabei zeigt **1210** eine Schaltung, die als Pulsquelle dienen kann, bestehend aus den vier Modulen **1240**, **1250**, **1260**, **1270**, wobei jedes Modul symbolisch mit vier Schaltern dargestellt ist. Modul **1240** stellt das versorgte Hauptmodul dar. Die nach unten folgenden Module sind alle nach dem gleichen Schema als passive Vierquadranten-Module mit je einem Speicherkondensator ausgeführt, wobei sich die Spannungen der Module **1250**, **1260**, **1270** jeweils halbiert. Bei den dargestellten vier Modulen (einem versorgten Hauptmodul und 3 passiven Kondensatormodulen) werden die einzelnen Spannungen nach den Werten U_0 , $U_0/2$, $U_0/4$, $U_0/8$ aufgeteilt. Die Ausgangsspannung, die an die Stimulationspule **1205** abgegeben wird, kann daher abgestuft in Achtel-Schritten relativ zur maximalen Spannung U_0 dargestellt werden. Die Reihenfolge der Module ist in der Fig. 12 zwar streng nach abfallenden Spannungen sortiert, kann aber infolge der Reihenschaltung beliebig gewählt werden. Das Klemmenpaar **1280**, **1281** stellt die Anschlüsse der Versorgung des Energiespeichers des Hauptmoduls dar. Die Ausgangsklemmen **1290**, **1291** bilden den Ausgangskreis, an den die Stimulationsspule **1205** angeschlossen ist. Hier während der Pulsabgabe kann eine variable gestufte positive oder negative Spannung im Bereich von mindestens $-U_0$ und U_0 dargestellt werden. Die Modulkette **1220** stellt die Pulsquelle mit Transistoren und den zugehörigen Body-Dioden dar; die Modulkette **1230** zeigt die gleichen Module symbolisch mit einer Länge, die ihrer jeweiligen Spannung entspricht.

[0079] Durch einen entsprechenden Strom im Kreis der Ausgangsklemmen und der Stimulationsspule **1205** werden die Kondensatoren der Module je nach geschalteter Polarität entladen oder geladen, was zu einem entsprechenden Ansteigen oder Absinken der Spannungen der Kondensatoren führen würde. Daher wird ein Modul, dessen Kondensator beispielsweise zu weit entladen ist (dessen Spannung also um eine kleine Toleranzgrenze unter einem jeweiligen Sollwert liegt), in einem nächsten Schritt so umgeschaltet, dass sein Kondensator umgekehrt im Signalweg liegt. Auf diese Weise wird der entsprechende Kondensator durch den Laststrom wieder aufgeladen. Da sich durch dieses Invertieren nicht nur die Klemmenspannung dieses Moduls sondern auch die Gesamtspannung der ganzen Kette verändert, muss entsprechend der gewünschten Sollspannung an den Ausgangsklemmen **1290**, **1291** dann eine an-

dere Kombination von Modulen geschaltet werden, um den gleichen Spannungswert zu erzielen.

[0080] Anstelle eines einzigen aktiven versorgten Hauptmoduls bzw. einer Spannungsquelle können auch mehrere solche aktive versorgte Hauptmodule in Serie geschaltet sein, um die entsprechende Pulsquelle aufzubauen.

[0081] Fig. 13 stellt beispielhaft einige mögliche Schaltkombinationen der vier Module von Fig. 12 in Form von Spannungspfeilen dar. Die Pfeillänge ist in der Darstellung proportional zur jeweiligen Spannung gewählt. Die schwarzen Pfeile symbolisieren dabei die Spannungen der gerade aktiv geschalteten Module; der graue Pfeil entspricht der Ausgangsspannung des Systems. Pfeil **1330** der Schaltkombination **1310** stellt die Spannung U_0 des versorgten Hauptmoduls dar. Die Module **1250**, **1260**, **1270** sind zwar alle aktiv geschaltet, haben aber inverse Polarität. Entsprechend sind die Pfeile **1332**, **1334** und **1336** mit umgekehrter Richtung dargestellt.

[0082] Die Pfeilrichtungen lassen gleichzeitig einen Rückschluss auf die Stromflussrichtung zu. Wenn an den Ausgangsklemmen eine Last angeschlossen ist, würde eine Pfeilrichtung nach unten eine Stromabgabe bedeuten und eine Pfeilrichtung nach oben eine Stromaufnahme. Im vorliegenden Fall wird also das versorgte Hauptmodul **1240** entladen, während die Module **1250**, **1260**, **1270** geladen werden. Die resultierende Spannung, die am Klemmenpaar **1290**, **1291** abgegriffen werden kann, wird durch den Pfeil **1338** dargestellt. Entsprechend ist die Spannung an den Ausgangsklemmen positiv und hat den Wert $U_0/8$. Bei der Schaltkombination **1312** wird die gleiche Ausgangsspannung von $U_0/8$ wie in der ersten Konfiguration erzeugt. Jedoch wird hier das versorgte Hauptmodul jetzt im Bypass-Modus betrieben, so dass es keine Spannung abgibt. Modul **1250** würde hier jetzt entladen werden, während die Module **1260** und **1270** weiter geladen werden. Entsprechend existieren auch Schaltkombinationen, bei denen die Module **1260** und **1270** entladen werden können. Die Schaltkombinationen **1314** und **1316** erzeugen jeweils Spannungen von $U_0/4$ und die Schaltkombinationen **1318** und **1320** Spannungen von $3/8 \cdot U_0$. Durch die Schaltkombination **1322** kann an den Ausgangsklemmen eine Spannung von $U_0/2$ erzeugt werden. Bei Umkehrung aller Pfeilrichtungen können entsprechende negative Spannungen erzeugt werden.

[0083] Für eine Modulkette, bestehend aus einem Hauptmodul welches die Spannung U_0 liefern kann und weiteren $n - 1$ Vierquadranten-Modulen (d.h. insgesamt n Module), wobei die Modulspannungen als Zweierpotenzen abgestuft sind, lässt sich folgender Zusammenhang zeigen:

An den Ausgangsklemmen einer solchen Modulkette kann jede beliebige Spannung von $-U_0$ bis U_0 in Stu-

fen von $U_0/(2^{(n-1)})$ dargestellt werden und zwar unabhängig vom aktuellen Ladezustand der einzelnen Energiespeicherelemente. Mit dem Ladezustand ist dabei gemeint, dass für jedes Modul der jeweilige Energiespeicher entweder in einem Zustand ist, dass er geladen werden sollte (aktuelle Spannung liegt unter der Sollspannung für dieses Modul) oder in einem Zustand, dass er entladen werden sollte (aktuelle Spannung liegt über oder ist gleich der Sollspannung für dieses Module). Da sich beispielsweise bei Verwendung von Kondensatoren als Energiespeicherelemente, die Spannung während des Ladens bzw. Entladens kontinuierlich verändert, muss für ein längeres Halten einer bestimmten Spannung unter Last (also während der Zeitdauer, in der eine bestimmte Spannungsstufe im Pulsverlauf dargestellt werden soll) – entsprechend den Ladezuständen der Modul-Kondensatoren – ständig zwischen bestimmten Modulkonfigurationen hin und hergeschaltet werden. Diese bestimmten Modulkonfigurationen liefern dabei jeweils gleiche Gesamtspannungen, lassen aber ein wunschweises Laden bzw. Entladen der betreffenden Modul-Kondensatoren zu. Daher existieren für jede darstellbare Spannung – außer 0V und der maximalen Spannung U_0 – immer mindestens zwei Modulkonfigurationen zur Darstellung dieser Spannung.

[0084] Diese Bedingung kann auch für andere Spannungsabstufungen einzelner Modul-Kondensatoren erfüllt werden. Insbesondere, falls mehrere Gleichspannungskreise zur Verfügung stehen, können auch Konfigurationen verwendet werden, bei denen mehrere versorgte Hauptmodule verwendet werden. Dabei ist allerdings noch zu berücksichtigen, dass während der Pulsabgabe sich auch der Kondensator des Hauptmoduls langsam entlädt, da dieser während der Pulsabgabe nicht (oder nur wenig) nachgeladen wird. Damit verändert sich auch dessen Spannung U_0 . Entsprechend sollten während des Pulsverlaufes dann auch die Kondensator-Spannungen der anderen Vierquadranten-Module mit verändert werden, damit die oben beschriebenen Spannungsverhältnisse weiter bestehen bleiben. Eine solche Anpassung der Kondensator-Spannungen kann eine entsprechende Steuerung der Pulsquelle durch gezieltes Laden und Entladen der Modul-Kondensatoren während der Pulsabgabe – bei gleichzeitiger Einhaltung des Sollspannungsverlauf – erreichen.

[0085] Die Frequenz, mit der solche Modulkonfigurationen umgeschaltet werden müssen, wird einerseits durch die Feinheit der erlaubten Toleranz bzgl. der Modulkondensator-Spannungen, durch den Laststrom und durch die Kapazität der Kondensatoren bestimmt. Insbesondere können durch große Kapazitäten der Modul-Kondensatoren kleinere Schaltfrequenzen erreicht werden. Bei ausreichenden Kapazitäten der Modul-Kondensatoren in Relation zum Spulenstrom müssen die Modulkonfigurationen während

der einzelnen Spannungsstufen des Pulsverlaufes nicht umgeschaltet werden.

[0086] Umgekehrt können die Kapazitäten der Kondensatoren der Vierquadranten-Module – welche einen wichtigen Kostenfaktor bei solchen leistungselektronischen Schaltungen darstellen – stark verkleinert werden, in dem der obige Vorgang mit relativ hoher Schaltfrequenz durchgeführt wird. Eine Erhöhung der Schaltfrequenz erhöht allerdings die Schaltverluste der Transistoren.

Anzahl der einstellbaren Spannungsstufen:

[0087] Im folgenden soll – ausgehend von einer Abstufung der Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente in Zweierpotenzen – die Anzahl der möglichen einstellbaren Spannungsstufen betrachtet werden. Als höchste Spannungsstufe sei hier – aus Gründen der Nachladbarkeit der Vierquadranten-Module – nicht die Summen-Spannung aller n Module gerechnet, sondern nur die Stufe des Hauptmoduls. Dies lässt sich auch in binärer Schreibweise darstellen, bei der jedes Modul eine Binärstelle darstellt, wobei die 1 einen positiven Spannungszustand darstellt und die 0 einen Bypass-Zustand (der invertierte Spannungszustand kann für diese Betrachtung vernachlässigt werden, da er nur für negative Spannungen bzw. zum Nachladen der Module benötigt wird). Für eine Pulsquelle, bestehend aus 5 Modulen, also $n = 5$ wäre dann diese höchste Spannungsstufe in Binärschreibweise eine 10000 (d.h. das Hauptmodul ist aktiv, die restlichen 4 Vierquadranten-Module sind im Bypass-Zustand).

[0088] Damit ergibt sich die Anzahl S_+ der positiven Stufen zu:

$$S_+ = 2^{n-1} + 1$$

[0089] Dies ist die Anzahl der Möglichkeiten ohne die höchste Stufe und „+1“ durch die höchste Stufe. Entsprechend der Darstellung nach dem Binärsystem ist die Null dann bereits enthalten. Wenn man die Anzahl der möglichen negativen Stufen S_- mit berücksichtigen will, muss man hier entsprechend die Stufe 0 weglassen, so dass sich eine Gesamtanzahl S von darstellbaren Spannungsstufen ergibt zu:

$$S = S_+ + S_- = (2^{n-1} + 1) + 2^{n-1} = 2 \cdot 2^{n-1} + 1 = 2^n + 1$$

Einfache Beispiele zum Funktionsprinzip:

Beispiel 1, Erzeugung einer bestimmten Spannungsstufe mit 2 Modulen:

[0090] Die in Fig. 14 dargestellte Pulsquellen-Schaltung soll zunächst nur aus zwei Modulen bestehen, einem Hauptmodul **1410** mit 1200V und einem Vierquadranten-Modul **1420**, welches bei einer

Spannung von 600V betrieben werden soll. Weiterhin soll die Schaltung zunächst an ihre angeschlossene Stimulationsspule **1450** einen momentanen Spannungswert von 600 V (d.h. die Spannung der „kleinsten Stufe“) liefern, wobei auch ein gewisser Spulenstrom fließen soll. Die Startkonfiguration der Schaltung sei dabei so gewählt, dass das 600V-Modul mit 600V vorgeladen ist.

Zeitspanne 0 bis t_1 , **1470**:

[0091] Zunächst wird daher das 1200V-Modul in den Bypass-Zustand geschaltet (z.B. in dem nur die beiden rechten Transistoren dieses Moduls gemäß der Abbildung eingeschaltet werden).

[0092] Das 600V-Modul gibt die geforderten 600V ab, wobei sich allerdings der Modulkondensator mit der Zeit entlädt, bis eine untere Toleranzschwelle erreicht ist. Beispielsweise bei Unterschreiten einer Spannung von 590 V muss das System dann umschalten.

Zeitspanne t_1 bis t_2 , **1472**:

[0093] Nun wird das 1200V-Modul aktiv auf +1200V geschaltet, während das 600V-Modul mit seiner reduzierten Spannung von 590V negativ in Serie geschaltet wird. Damit ergibt sich nun eine neue Gesamtspannung von $1200V - 590V = 610V$, die sich – diesmal durch das Aufladen des Kondensators – wieder langsam bis zur Toleranzschwelle absenkt. Die gesamte Kapazität der Serienschaltung zweier Module ist gegenüber der ersten Zeitspanne leicht reduziert, da vorzugsweise die Kapazität des Hauptmoduls deutlich größer ist, als die des Vierquadranten-Moduls (vereinfachend ist hier angenommen, dass sich die Kondensatorspannung des 1200V-Moduls während des kurzen Pulses nicht verändert). Dabei wird – durch den invertierten Betrieb – das 600V-Modul auf eine Spannung von 610V geladen. Gleichzeitig, sinkt die Spannung des Hauptmoduls ggf. leicht ab, wie bereits oben diskutiert.

Zeitspanne t_2 bis t_3 , **1474**:

[0094] Hier ist nun wieder nur das 600V-Modul aktiv, nur startet es mit 610V, so dass die dritte Zeitspanne so groß ist, wie die zweite.

Beispiel 2, Erzeugung einer Gleichspannung mit 3 Modulen:

[0095] Die in **Fig. 15** dargestellte Pulsquellen-Schaltung soll aus drei Modulen bestehen, einem Hauptmodul **1510** mit 1200V und zwei Vierquadranten-Modulen **1520**, **1530**, einem Modul für 600V und einem Modul für 300V. Auch hier soll wieder angenommen werden, dass die Kapazität des Hauptmodul-Kondensators so groß ist, dass sich seine Spannung

während der kurzen Pulsabgabe nicht oder nur wenig ändert. Die Schaltung soll jetzt an die Stimulationsspule **1560** einen momentanen Spannungswert von 300V liefern, wobei wieder ein Spulenstrom als Laststrom fließt. Die Startkonfiguration der Schaltung sei dabei entsprechend wieder so gewählt, dass das 600V-Modul mit 600V und das 300V Modul mit 300V vorgeladen ist.

Zeitspanne 0 bis t_1 , **1580**:

[0096] Zunächst werden das 1200V-Modul und das 600V-Modul in den Bypass-Zustand geschaltet. Das 300V-Modul gibt die geforderten 300V ab, wobei sich der Modulkondensator mit der Zeit entlädt, bis eine untere Toleranzschwelle von beispielsweise 290V erreicht ist.

Zeitspanne t_1 bis t_2 , **1582**:

[0097] Das 600V-Modul wird nun aktiviert und das 300V-Modul hierzu umgekehrt in Serie geschaltet. Die Startspannung ist hier jetzt $600V - 290V = 310V$. Dieser Vorgang läuft, bis – bedingt durch den Laststrom der Spule – die Gesamtspannung wieder auf 290V abgefallen ist. Zu diesem Zeitpunkt ist (bei angenommen gleicher Kapazität der Modulkondensatoren) die Spannung des 300V-Moduls wieder auf 300V angestiegen; die Spannung des 600V-Moduls liegt jetzt bei 590V. Die durchlaufene Spannungsdifferenz ist doppelt so hoch, wie bei der ersten Zeitspanne; allerdings liegen nun 2 Modul-Kondensatoren (beispielsweise gleicher Kapazität) in Serie, so dass die Zeitspanne gleich lang ist, wie die erste.

Zeitspanne t_2 bis t_3 , **1584**:

[0098] Da nun der 300V-Kondensator wieder auf 300V geladen ist, kann nun wieder ein Zyklus wie in der ersten Spanne verwendet werden. Am Ende dieser Spanne ist der 300V-Modul-Kondensator entsprechend auf 290V entladen.

Zeitspanne t_3 bis t_4 , **1586**:

[0099] Jetzt ist sowohl der Kondensator des 300V-Moduls als auch der des 600V-Moduls unter die jeweilige Toleranzschwelle entladen. Daher werden in dieser Zeitspanne diese beiden Modulkondensatoren antiserial mit dem 1200V-Hauptmodul geschaltet. Auf diese Weise ergibt sich eine Startspannung von $1200V - 590V - 290V = 320V$. Die Spannung sinkt wegen der beiden seriell liegenden Kondensatoren etwas wieder so schnell wie in der zweiten Phase (wieder unter der Annahme, dass die Kapazität des Hauptmoduls deutlich größer ist als die der beiden Vierquadranten-Module); allerdings ist der Spannungshub etwas größer, da die Spannung nun von 320V auf 290V sinkt. Am Ende beträgt die Kondensa-

torspannung des 600V-Moduls gemäß dem Beispiel 605V und die des 3V-Moduls 305V.

Zeitspanne t_4 bis t_5 , **1588**:

[0100] Nun kann wieder das 300V-Modul alleine aktiviert werden; die Spannung sinkt von 305V auf 290V.

[0101] Entsprechend diesen Beispielen kann die in **Fig. 11** dargestellte Stufenfunktion als eine Aneinanderreihung kurzzeitig auszugebender Gleichspannungswerte betrachtet werden. Damit kann eine solche Spannungsstufe sozusagen eine Substruktur aufweisen, wenn während der Zeitdauer, in der eine Spannungsstufe gehalten werden soll, mehrere Lade- und Entladezyklen von Modulen erforderlich sind.

Vorteile bevorzugter
Ausführungsformen der Erfindung:

[0102] Die vorgeschlagene Pulsquelle ermöglicht eine nahezu freie Wahl der Pulsform für die Reizung von Nerven- und Muskelzellen. Hierdurch können Pulse erzeugt werden, die hinsichtlich eines Parameters optimiert sind, wie beispielsweise der Energiebedarf, die maximale Spulensspannung oder das entstehende Klickgeräusch der Spule. Damit wiederum können die Geräte hinsichtlich ihrer Bauform und Anwendung optimiert werden (beispielsweise kleine, gut transportierbare Pulsquellen bzw. Spulen, die wegen der reduzierten Verluste lange Reizserien applizieren können).

[0103] Die freie Wahl der Pulsform gestattet es darüber hinaus – je nach Pulsform – gezielt bestimmte Nerven-Zellpopulationen bevorzugt zu reizen, während andere Zelltypen entsprechend besser von einer ungewünschten Reizung ausgeblendet werden können. Auf diese Weise kann ein gewünschter Zielort noch besser angeregt werden, als dies mit bisherigen Geräten möglich war.

[0104] Insbesondere die Fähigkeit, beliebig viele verschiedene Pulsformen über ein einziges Gerät erzeugen zu können, stellt einen beträchtlichen Vorteil bezüglich Geräten dar, die nach dem beschriebenen Stand der Technik ausgeführt sind. Bei Verwendung dieser bisherigen Geräte war für nahezu jede Pulsform ein eigenes Gerät erforderlich.

Einsatzgebiete der Erfindung

[0105] Einerseits lässt sich die vorgestellte Pulsquelle für alle Gebiete der magnetischen Neurostimulation einsetzen, die bisher bereits von Geräten entsprechend dem Stand der Technik verwendet wurden. Dabei vereinen die Pulsquellen gemäß der vorliegenden Erfindung aber hinsichtlich ihrer Funktionalität

alle bisherigen Stimulationsgeräte in einer einzigen Schaltung.

[0106] Entsprechend lässt sich die erfindungsgemäße Pulsquelle beispielsweise in den Bereichen Neurorehabilitation (z.B. Muskeltraining, Wiedererlernen von Bewegungsmustern), Neurochirurgie (präoperatives corticales Mapping), für die Tinnitus-Behandlung, die Unfallchirurgie, sowie in zahlreichen Gebieten der neurologischen Forschung einsetzen.

[0107] Weiterhin lassen sich aber auch neue Forschungs-, Diagnose- und Therapieanwendungen durch die neue Pulsquelle erschließen, die speziell auf der hohen Flexibilität der Pulsform basieren. Beispielsweise können somit erstmal schmerzfrei aufwändige Nervenuntersuchungen und Nervenanalysen durchgeführt werden, die – basierend auf einer großen Anzahl applizierter unterschiedlicher Einzelpulse und deren Reizantworten – unterschiedliche Zelltypen klassifizieren oder – basierend auf einer krankheitsbedingten Änderung der elektrischen Zellparameter – entsprechende neurologische Krankheiten diagnostizieren können.

[0108] Weiterhin kann die Schaltung auch für andere Anwendungen eingesetzt werden, bei denen elektrische Pulse hoher Leistung bei frei wählbarer Pulsform benötigt werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5 [0014]
- R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5 [0018]
- R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5 [0023]
- R. Siebner, U. Ziemann, „Das TMS-Buch“, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-71904-5 [0027]
- Peterchev et al. 2008 [0030]
- A. V. Peterchev, R. Jalinous, and S. H. Lisanby: A Transcranial Magnetic Stimulator Inducing Near-Rectangular Pulses With Controllable Pulse Width (cTMS), IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 55, no. 1, 2008 [0030]
- A. L. Hodgkin, A. F. Huxley: A Quantitative Description of Membrane Current and its Application to Conduction and Excitation in Nerve. Journal of Physiology. 117, 1952, S. 500–544 [0060]

Schutzansprüche

1. Pulsquelle für die Applikation von induzierten elektrischen Pulsen im medizinischen Bereich, mit einer modular aufgebauten Pulsquelle zur Erzeugung von Spannungspulsen mit steuerbarem zeitlichen Verlauf, einer mit der modular aufgebauten Pulsquelle verschalteten Stimulationsspule zum Erzeugen eines Magnetfeldes aufgrund der auf die Stimulationsspule einwirkenden Spannungspulse, zur Erzeugung induzierter elektrischer Pulse, und einer Ladeschaltung, wobei die modular aufgebaute Pulsquelle aufweist: mindestens ein über die Ladeschaltung aufzuladendes Hauptmodul, $n - 1$ weitere Module, wobei n ganzzahlig ist und gilt $n \geq 2$, wobei alle mindestens n Module über ihre Modulan-schlüssen seriell miteinander verschaltet sind, wobei jedes Modul eine Energiespeichereinrichtung, vorzugsweise einen Kondensator zum Speichern von Ladung aufweist sowie jedes Modul Schalteinrichtungen aufweist, vorzugsweise gebildet durch Transistoren, zum wahlweise und gesteuertem Einstellen zumindest eines aktiven Normalbetriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung in den Spannungspfad der Serienschaltung einbringt und eines Bypass-Betriebs in dem das jeweilige Modul den Spannungspfad der Serienschaltung nur durchschaltet sowie vorzugsweise eines invertierten Betriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung invertiert in den seriellen Spannungspfad einbringt, einer Controller-Einrichtung zum direkten oder indirekten Erfassen der Ladungszustände der Energiespeichereinrichtungen aller n Module und zum Steuern der Schaltzustände der Schalteinrichtungen aller n Module, um für jedes der n Module zu einem bestimmten Zeitpunkt jeweils wahlweise einen bestimmten Betriebszustand einstellen zu können, wobei die Controller-Einrichtung so ausgelegt ist, dass der Ladungszustand jedes Energiespeicherelements eines jeweiligen Moduls im Betrieb der Pulsquelle über einen Applikationszeitraum im wesentlichen zwischen vorgegebenen Grenzwerten gehalten wird und damit im aktiven Betrieb des jeweiligen Moduls zu einem vorbestimmten Spannungsbeitrag im Spannungspfad führt und wobei die Spannungsbeiträge der Module im Applikationszeitraum unterschiedlich sind und vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen zueinander abgestuft sind, entsprechend U_0 , $U_0/2$, $U_0/4$, $U_0/8$ etc., und wobei die Stimulationsspule mit der Ausgangsspannung der Serienschaltung der Module gekoppelt ist.
2. Pulsquelle nach Anspruch 1, bei welcher der steuerbare zeitliche Verlauf der Spannungspulse so beschaffen ist, dass die von der Stimulationsspule in-

duzierten elektrischen Pulse während der Applikation in Nerven- oder Muskelzellen von Körpergewebe Aktionspotentiale auslösen.

3. Pulsquelle nach Anspruch 2, bei welcher die Controller-Einrichtung die Schaltzustände der Schalteinrichtungen so steuert, dass der gewünschte zeitliche Verlauf der Spannungspulse zusätzlich durch eine Pulsbreitenmodulation angenähert wird.

4. Pulsquelle nach Anspruch 2 oder 3, bei welcher die von der Stimulationsspule erzeugten induzierten elektrischen Pulse einen optimierten Zeitverlauf aufweisen, so dass die zur Auslösung von Aktionspotentialen benötigte Energie des Magnetfeldes minimiert wird.

5. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher die Energiespeichereinrichtung jedes Moduls ein Elektrolytkondensator oder ein Keramikkondensator ist.

6. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher die Schalteinrichtungen jedes Moduls durch MOSFETs oder IGBTs gebildet werden.

7. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher das indirekte Erfassen der Ladungszustände der Energiespeichereinrichtungen der Module über die Controller-Einrichtung jeweils über eine Berechnung der über die Energiespeichereinrichtungen ausgetauschten Energien erfolgt.

8. Pulsquelle nach Anspruch 7, bei welcher die Berechnung der über die Energiespeichereinrichtungen ausgetauschten Energien durch eine Simulation des zu erzeugenden Spannungspulses so erfolgt, dass vor der Erzeugung des Spannungspulses mit steuerbarem zeitlichem Verlauf die Schaltzustände der Schalteinrichtungen aller n Module im Voraus berechnet werden.

9. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer nachgeschalteten Glättungsschaltung zum Glätten der Ausgangsspannung der Serienschaltung der Module.

10. Pulsquelle nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Module als Vierquadrantenmodule mit Normalbetrieb, Bypass-Betrieb und invertiertem Betrieb ausgelegt sind und die Spannungsbeiträge aller Module gegeneinander gemäß Zweierpotenzen abgestuft sind.

11. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei es für jede momentan über das Schalten der einzelnen Schalteinrichtungen der Module vorgegebene Modulkonfiguration und der dadurch bewirkten Ausgangsspannung, mit Ausnahme

der Modulkonfigurationen für maximale (U_0), minimale ($-U_0$) und Null (0) Ausgangsspannung, mindestens eine alternative Modulkonfiguration gibt, die eingestellt werden kann und im wesentlichen zur gleichen Ausgangsspannung führt, wobei das Umschalten in diese alternative Modulkonfiguration ermöglicht, Module die zur Erhaltung ihres gewünschten Ladezustandes nachzuladen sind, im Rahmen der alternativen Modulkonfiguration in den invertierten Betriebszustand zu schalten, um dadurch die Nachladung des betreffenden Moduls zu erreichen, ohne dass es hierdurch zu einer Veränderung der in diesem Zeitpunkt dargestellten Spannungsstufe am Ausgang kommen muss.

12. Pulsquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Erfassung des Ladezustandes jedes Moduls durch die Controller-Einrichtung erfolgt, und diese Erfassung entweder direkt am jeweiligen Modul oder anhand der Ausgangsspannung und dem aktuellen Schaltzustand erfolgt.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

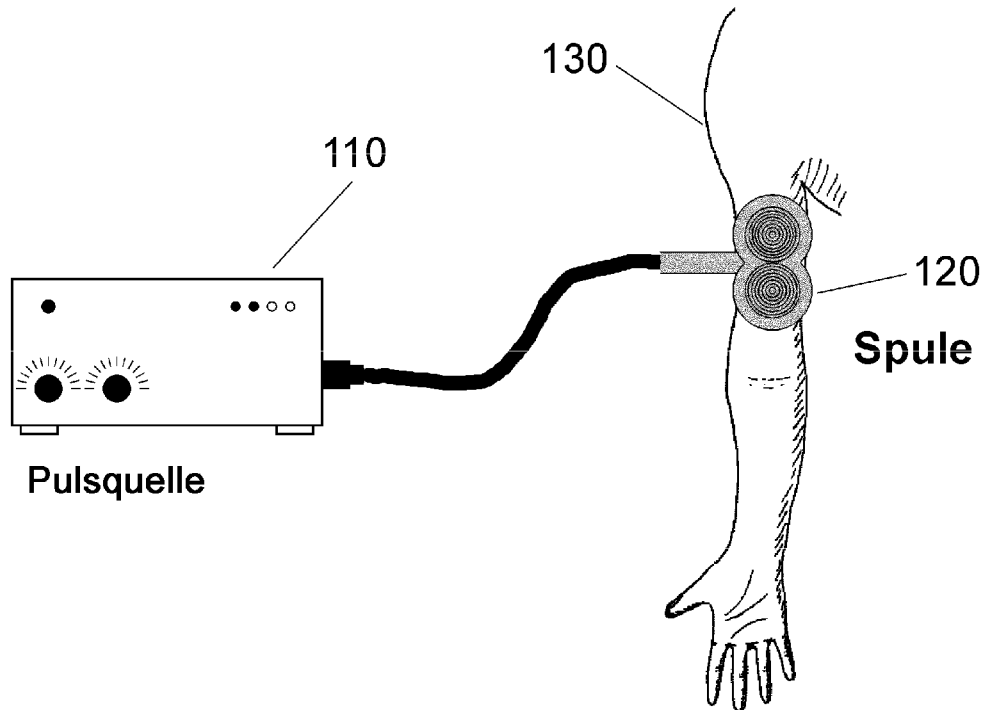


Fig. 1

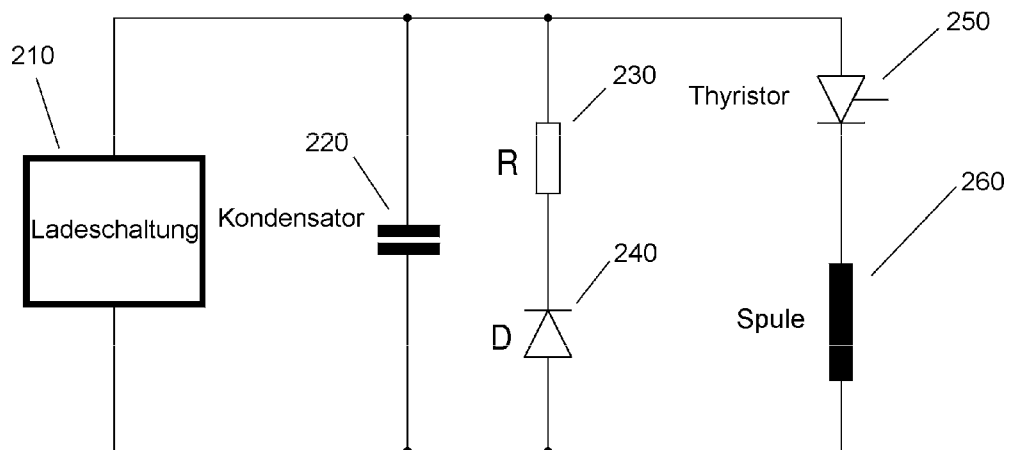


Fig. 2

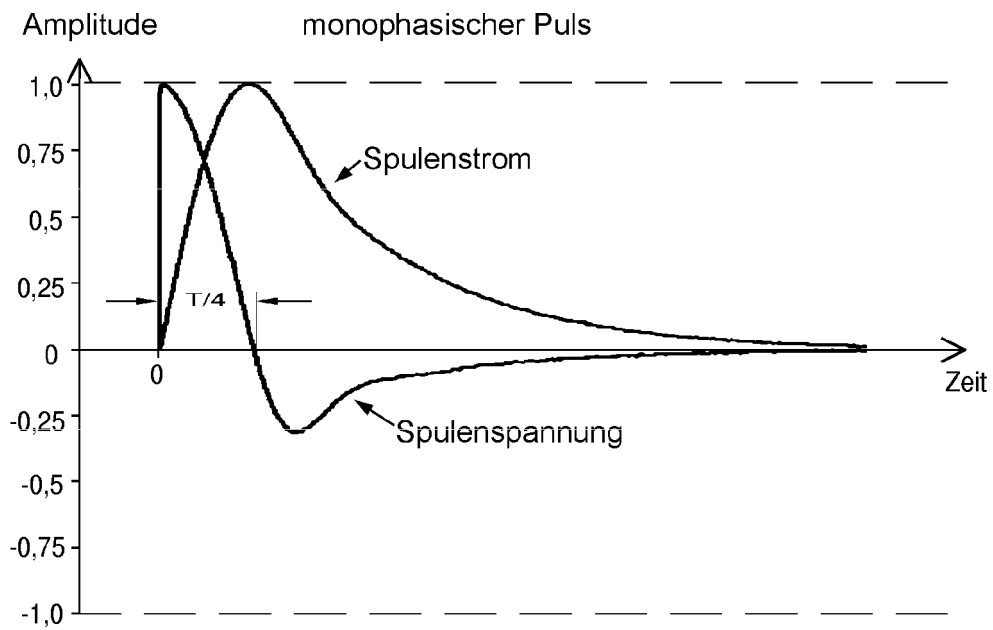


Fig. 3

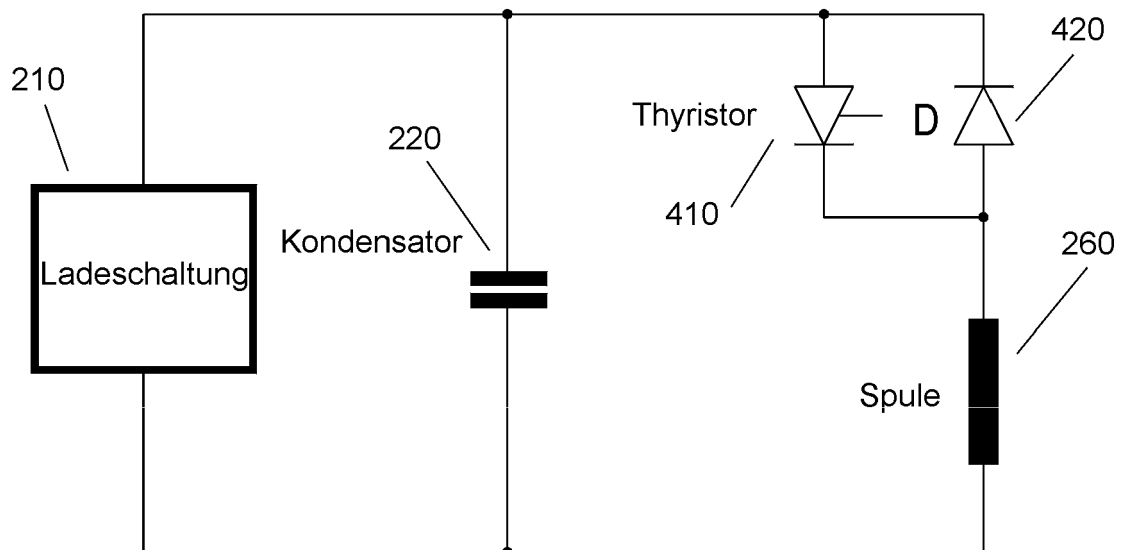


Fig. 4

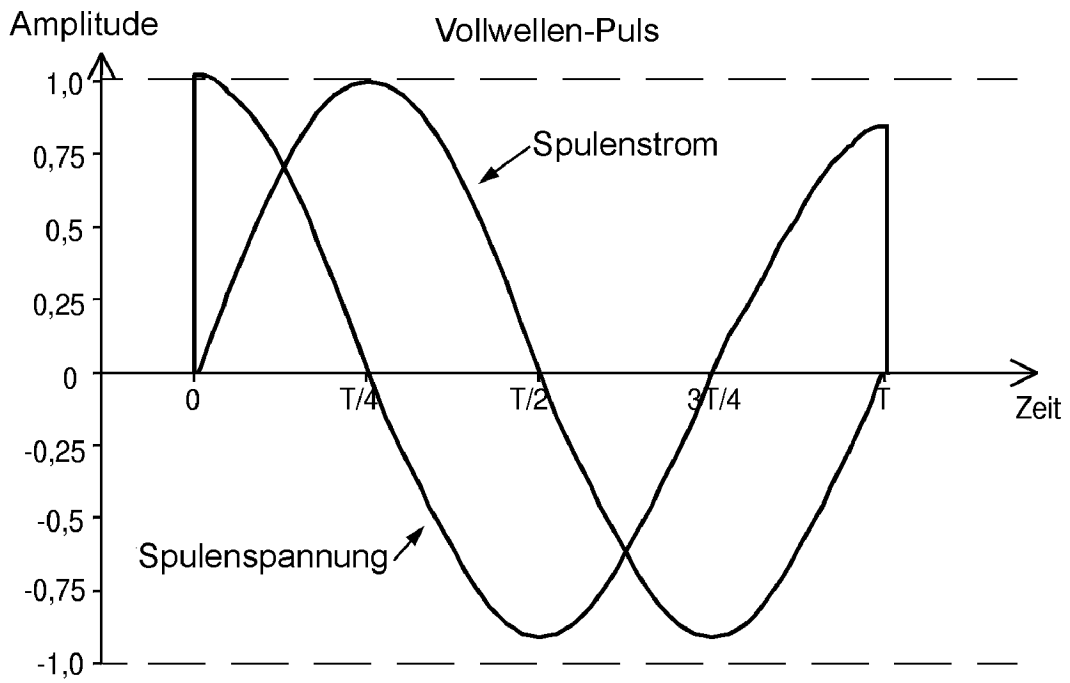


Fig. 5

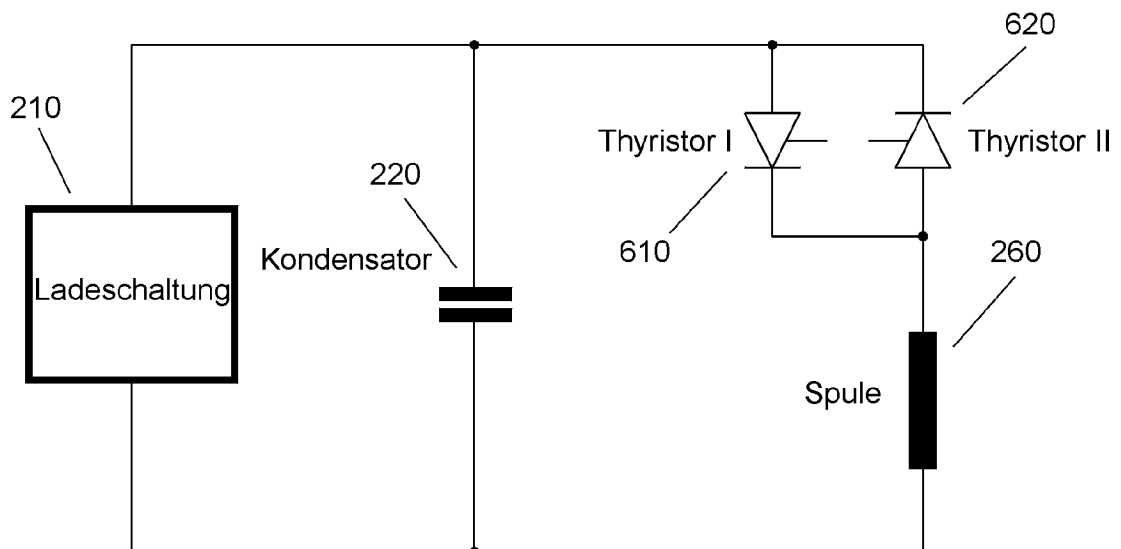


Fig. 6

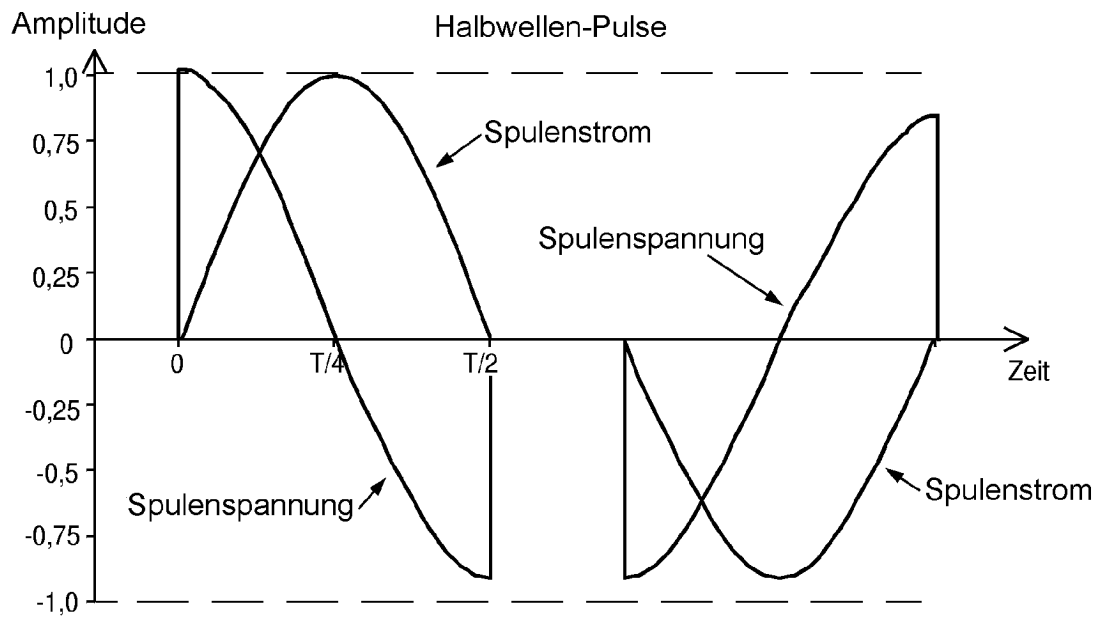


Fig. 7

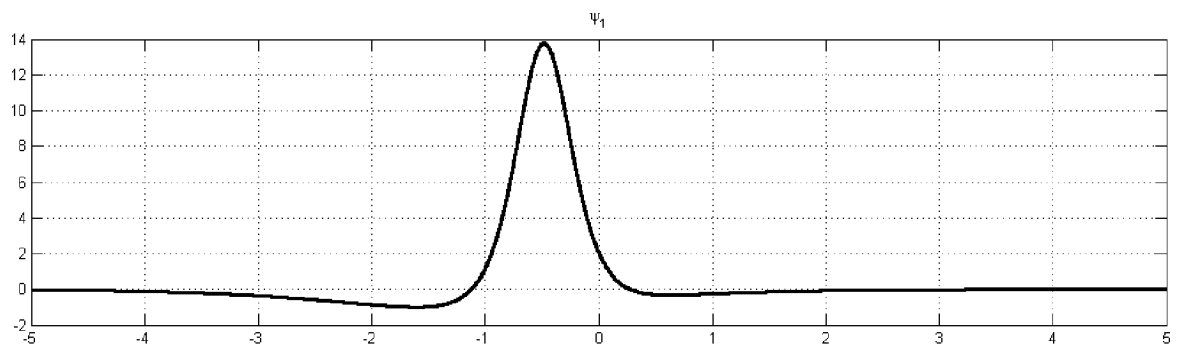


Fig. 8

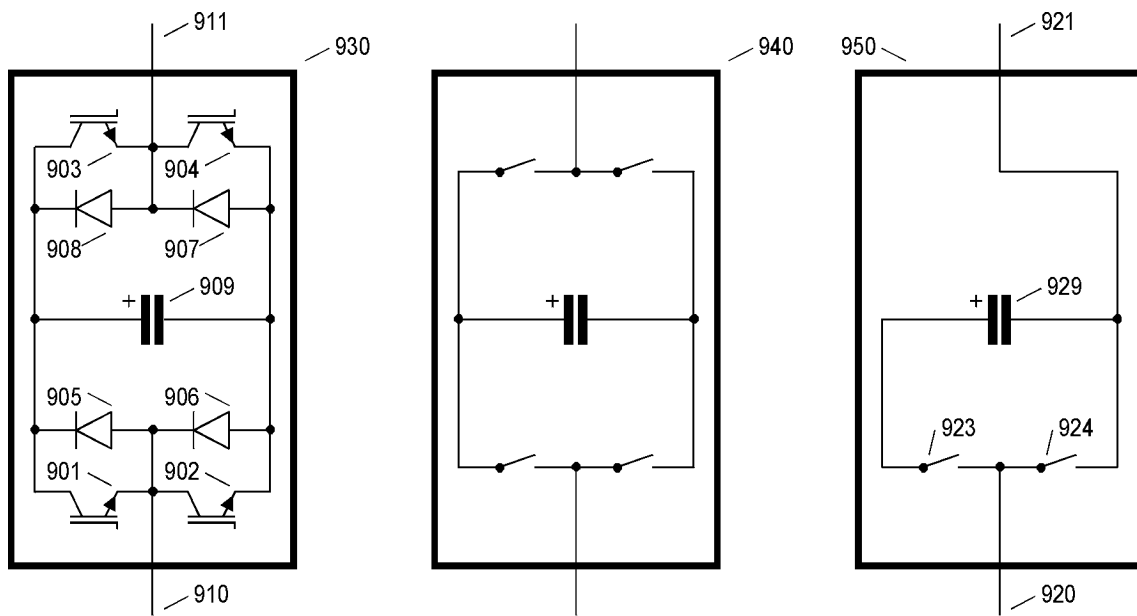


Fig. 9

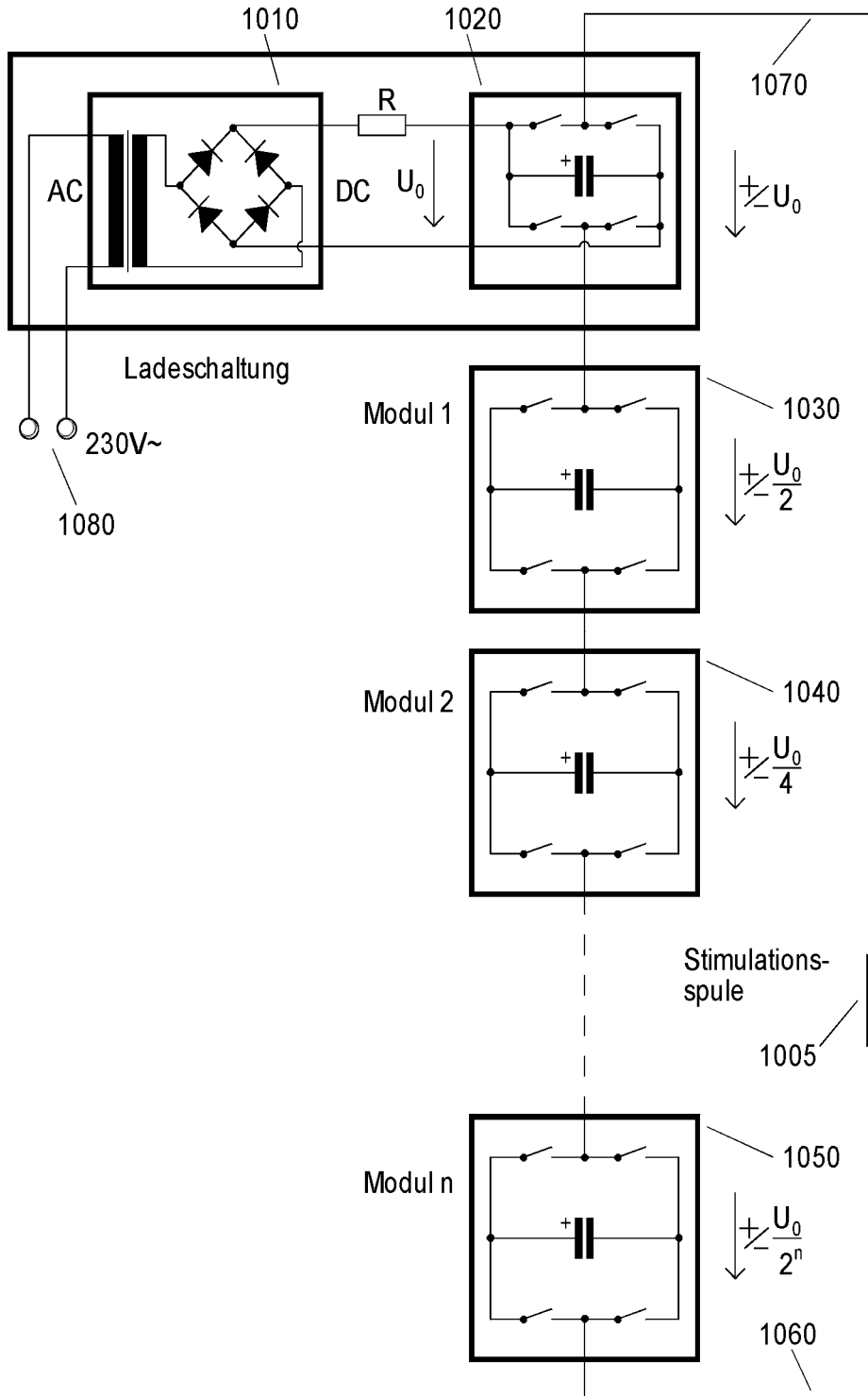


Fig. 10a

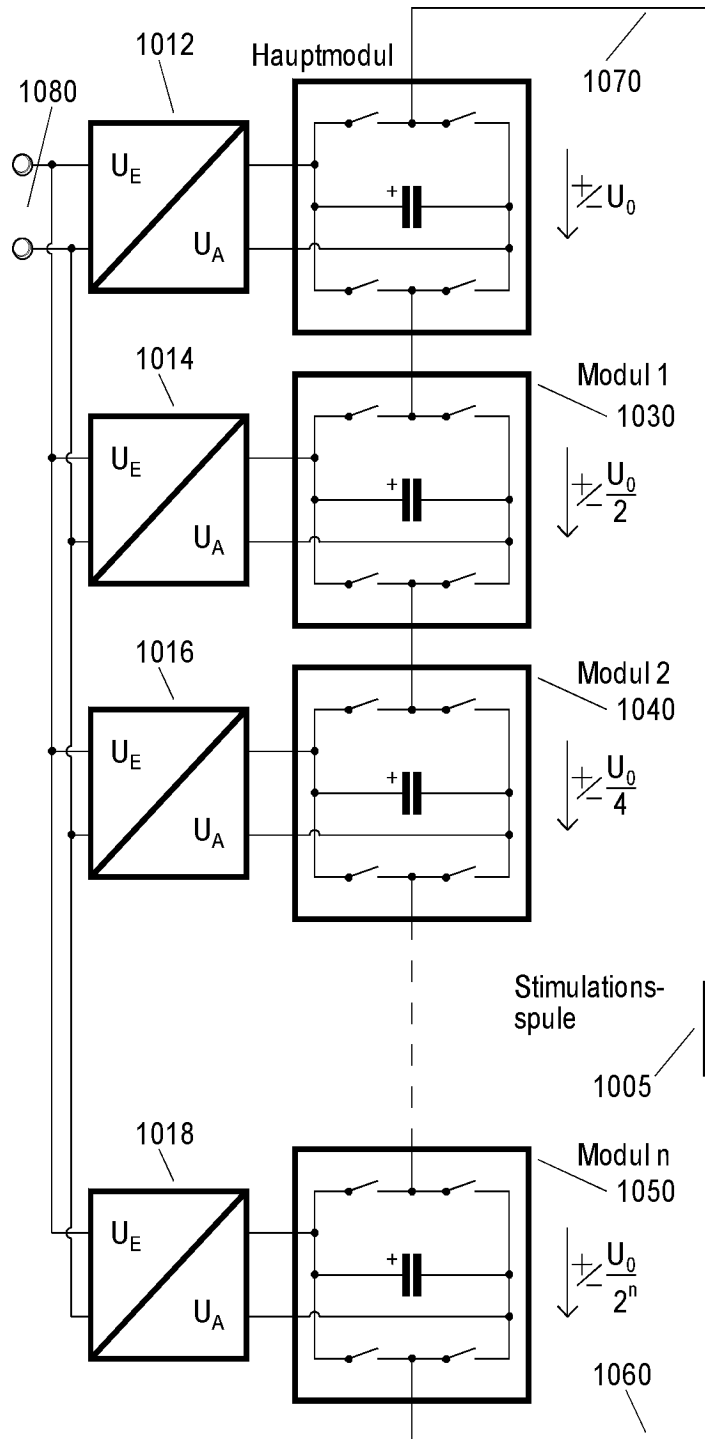


Fig. 10b

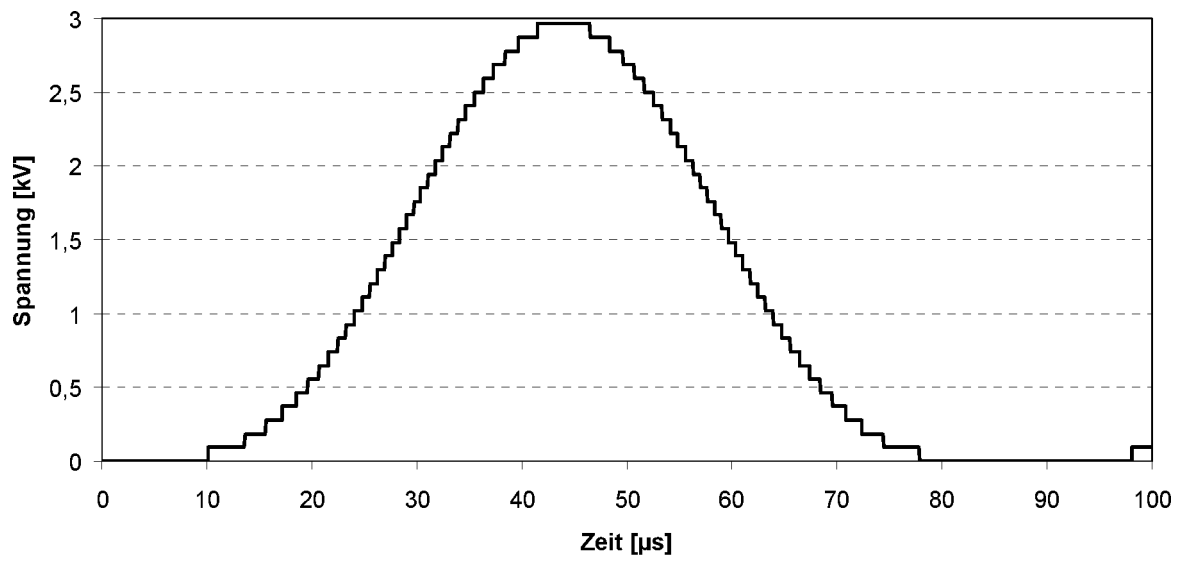


Fig. 11

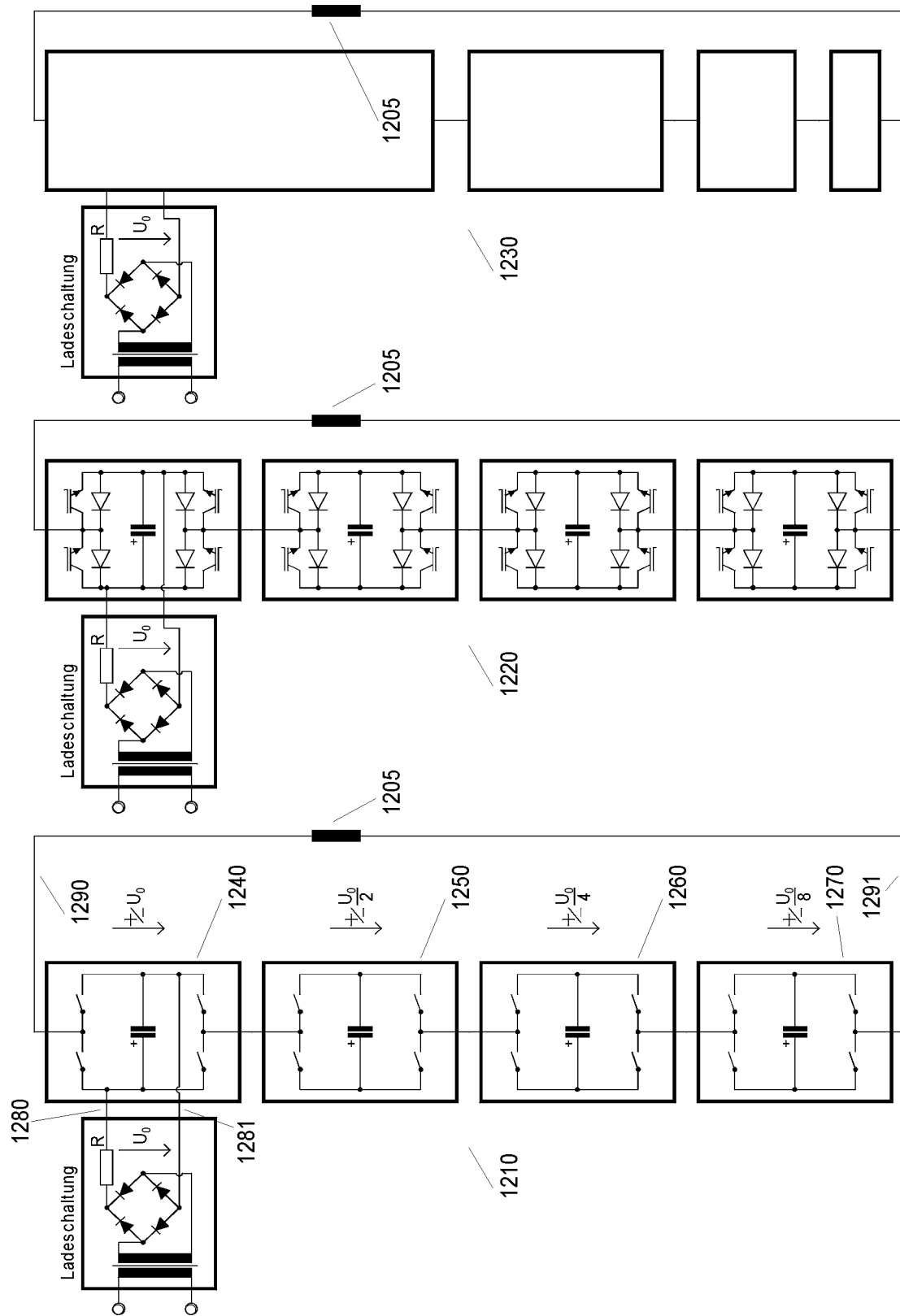


Fig. 12

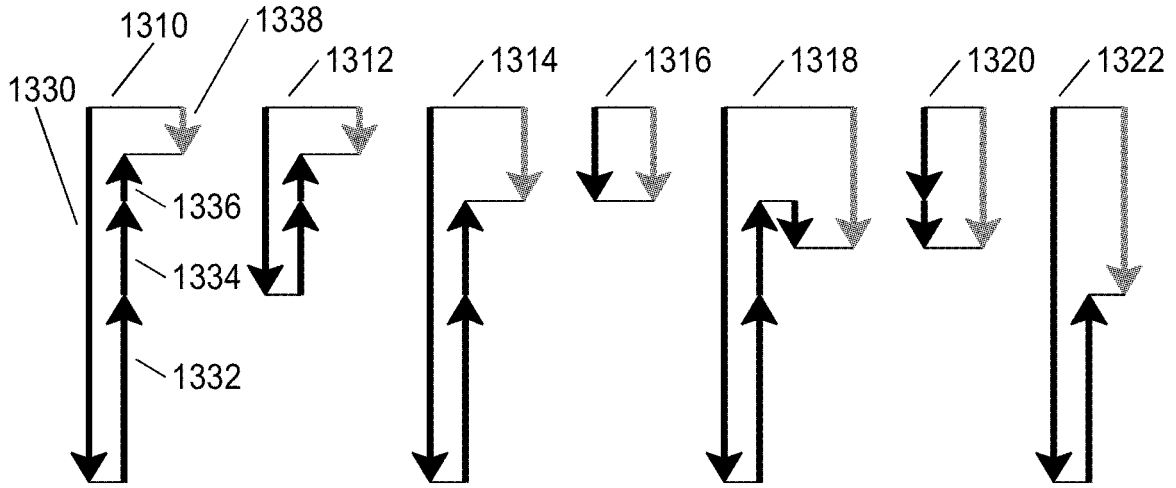


Fig. 13

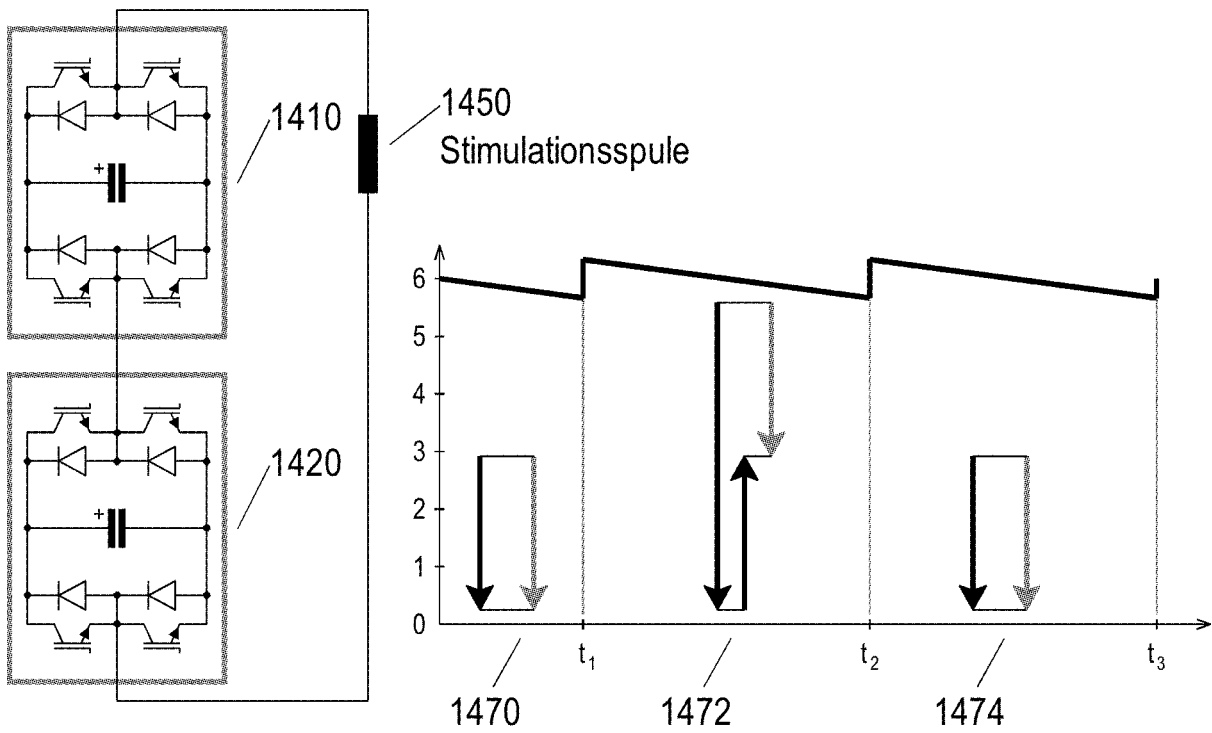


Fig. 14

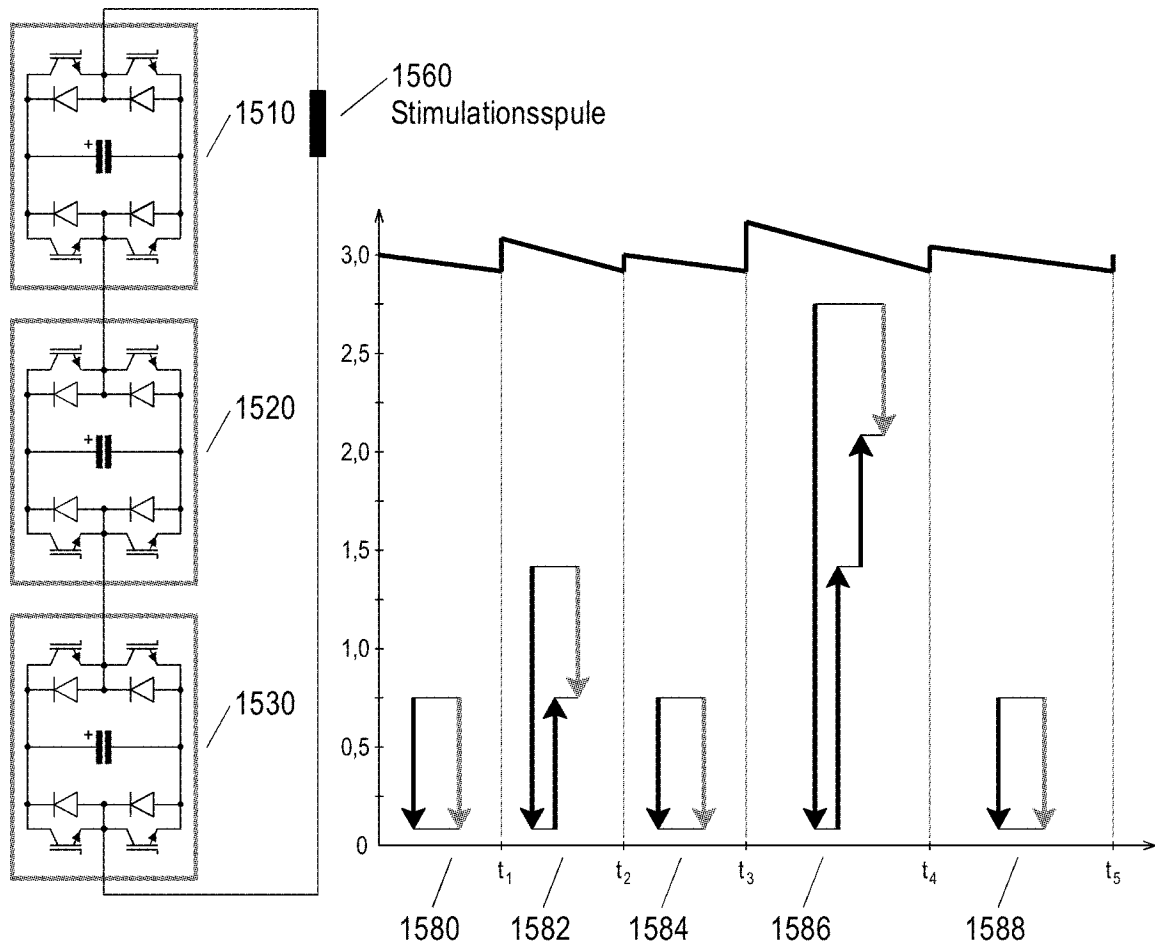


Fig. 15