

(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  
18. Oktober 2018 (18.10.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2018/189389 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:  
H02M 7/483 (2007.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/059572

(22) Internationales Anmeldedatum:  
13. April 2018 (13.04.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2017 108 099.6  
13. April 2017 (13.04.2017) DE

(71) Anmelder: UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN [DE/DE]; Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg (DE).

(72) Erfinder: WEYH, Thomas; c/o UniBw München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (DE). ECKERLE, Richard; c/o UniBw München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (DE). HELLING, Florian; c/o UniBw München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg (DE). KNAUER, Reinhard; c/o Grünecker Pa-

tent- und Rechtsanwälte PartG mbB, Leopoldstr. 4, 80802 München (DE).

(74) Anwalt: GRÜNECKER PATENT- UND RECHTSANWÄLTE PARTG MBB; Leopoldstrasse 4, 80802 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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,

(54) Title: CONVERTER FOR ENERGY TRANSMISSION

(54) Bezeichnung: STROMRICHTER FÜR ENERGIEÜBERTRAGUNG

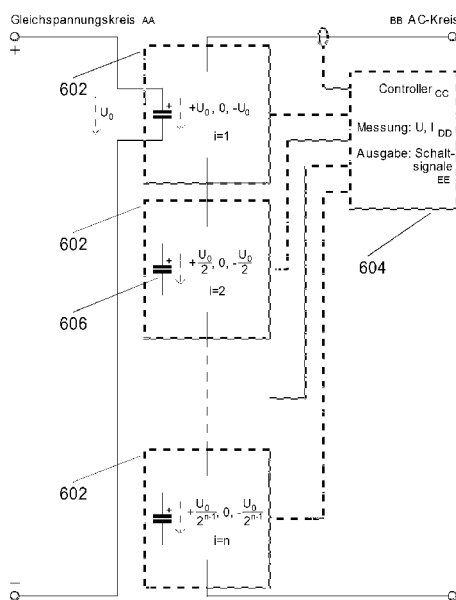


FIG. 6a

AA Direct voltage circuit  
BB AC circuit  
CC Controller  
DD Measurement: U, I  
EE Output: switch signals

(57) Abstract: The invention relates to a modular converter which is constructed from at least one main module, which is to be actively supplied, and an arbitrary number of N-1 further modules. All modules are connected to one another in series (for example via module clamps, wherein the term "module clamps" shall also include any other kind of electrical connection, and in particular plug connections). Each module comprises switch means and at least one energy storage means, as a result of which the individual module is able to be charged with an adjustable voltage. The switch means, which are preferably realised by transistors, allow the module to be connected in active operation in respect of the series circuit or in bypass operation, in which case the module in question is bridged, so to speak, and therefore cannot contribute to the voltage path of the series circuit. The output voltage of the converter is tapped at the end points of the series circuit.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen modularen Stromrichter, welcher aus mindestens einem aktiv zu versorgenden Hauptmodul und einer beliebigen Anzahl von N-1 weiteren Modulen aufgebaut ist. Alle Module sind miteinander seriell verschaltet (z.B. über Modulklemmen, wobei der Begriff Modulklemme auch jede andere Art elektrischer Verbindung und insbesondere Steckverbindungen umfassen soll). Jedes Modul weist Schalteinrichtungen sowie mindestens eine Energiespeichereinrichtung auf, wodurch das einzelne Modul in der Lage ist, mit einer einstellbaren Spannung aufgeladen zu werden. Die Schalteinrichtungen, die vorzugsweise durch Transistoren realisiert werden, gestatten eine Verschaltung des Moduls gemäß eines aktiven Betriebs in Bezug auf die Serienschaltung oder gemäß eines Bypass-Betriebs, bei dem das betreffende Modul quasi überbrückt wird und somit nicht zum Spannungspfad der Serienschaltung beitragen kann. Die Ausgangsspannung des Stromrichters wird an den Endpunkten der Serienschaltung abgegriffen.

WO 2018/189389 A1

DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,  
LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI,  
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,  
GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

## Stromrichter für Energieübertragung

Die Erfindung betrifft einen verbesserten Stromrichter, sowie ein entsprechendes Verfahren und betrifft insbesondere Stromrichter für bidirektionale Energieübertragung und mit der Möglichkeit die Ausgangsspannung stufenweise zu verändern.

Stromrichter dienen zur Umwandlung einer eingespeisten elektrischen Stromart (Gleichstrom, Wechselstrom) in die jeweils andere, oder zur Änderung charakteristischer Parameter wie der Spannung oder der Frequenz. Oft werden beide Prinzipien in Kombination angewendet.

Stromrichter kommen in den unterschiedlichsten Bereichen zur Anwendung. Insbesondere werden sie zur Ansteuerung elektrischer Maschinen, insbesondere auch für die Ansteuerung von Elektromotoren in Fahrzeugen verwendet. Ein weiterer Anwendungsbereich stellt die Energieversorgung/Stromversorgung in Stromnetzen, Bordnetzen oder allgemein in Energieversorgungsnetzen dar. Entsprechend gibt es unterschiedliche Arten von Stromrichtern. Zum einen die DC-to-DC Converter (DC-DC-Wandler), welche als Gleichspannungswandler eine erste Gleichspannung in eine zweite Gleichspannung umwandeln, die höher, niedriger oder invertiert sein kann. Zum anderen gibt es sogenannte AC-DC Converter, die Wechselstrom in Gleichstrom (Gleichrichter) oder Gleich- in Wechselstrom umwandeln (Wechselrichter). Durch die Zusammenschaltung zweier AC-DC Converter über die Gleichstromseite können hierdurch auch AC-AC Converter aufgebaut werden.

Moderne Stromrichter verwenden elektronische Bauelemente auf Basis von Halbleitern, wie Transistoren, Dioden und Thyristoren. Eine wichtige Grundschaltung stellen Zweiquadranten-Steller und Vierquadranten-Steller dar. Letztere gestatten, dass an einem Klemmenpaar sowohl negative als auch positive Spannungen unabhängig von der Stromrichtung verarbeitet werden können. Anwendungsfälle hierfür umfassen die gesteuerte Versorgung eines Elektromotors mit elektrischer Energie und die Rückwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie während der Bremsphase (Rekuperation).

Die fortwährende Entwicklung der vor etwa 35 Jahren eingeführten Halbleitertechnik in die Leistungselektronik ermöglicht und unterstützt die Realisierung solcher Stromrichter für immer höhere Leistungs- und Spannungsbereiche. Heute werden z.B. im Mittelspannungsbereich zum Schalten von elektrischen Strömen und Spannungen überwiegend IGBTs und IGCTs verwendet. Durch die ständige Weiterentwicklung der Halbleiter und deren Fertigungsprozesse hat die Zuverlässigkeit und Leistungsdichte dieser Bauelemente signifikant zugenommen.

Der Entwicklungsfortschritt von Halbleitern begünstigt auch die Entwicklung neuartiger Stromrichtertopologien. HGÜ-Anlagen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) im

Hochspannungsbereich (bis mehrere GVA), werden großteils immer noch mit Thyristorschaltungen realisiert. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Phasenanschnittsteuerung und können je nach Zündwinkel unterschiedliche Spannungspegel erzeugen bzw. verarbeiten. Dabei sind allerdings aufwändige Filterkreise nötig, um den hohen Oberwellenanteil auszufiltern. Neuerdings sind Mehrpunktstromrichter mit wesentlich verbesserten Eigenschaften zur Energieübertragung, Spannungs- bzw. Frequenzwandlung und Blindleistungs-Kompensation in den Mittelpunkt des Interesses gerückt.

Insbesondere in Anwendungsgebieten im Energieversorgungsbereich bei großen Leistungen sind die mit dem Stromrichter zu schaltenden Spannungen erheblich höher als die Sperrspannungen verfügbarer Leistungshalbleiter. Daher werden in solchen Einsatzgebieten Schaltungstopologien eingesetzt, welche eine gleichmäßige Aufteilung der hohen Eingangsspannung auf mehrere Schaltglieder/Leistungshalbleiter ermöglichen, beispielsweise durch Serienschaltung.

Viele Nachteile konventioneller Stromrichter für große Leistungen können durch sogenannte modulare Multilevelconverter gelöst werden, siehe beispielsweise DE 102 17 889 A1. Dieses System ist in der Lage nahezu beliebige Spannungsverläufe zwischen den Klemmenpaaren der einen Seite in ebenso beliebige Verläufe zwischen den Klemmenpaaren der anderen Seite umzusetzen, wobei auf Grund einer Bidirektionalität nicht zwischen Ein- und Ausgang unterschieden werden muss. Die für jede Phase zuständige Elektronik des Stromrichters ist aus einer Vielzahl von in Serie geschalteten identischen Einzelmodulen aufgebaut.

Figur 1 zeigt eine schematische Ansicht eines dreiphasigen Zweipunktstromrichters 110 für einen Elektromotor 120, wie er beispielsweise in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommt. Der Zweipunktstromrichter wird gebildet durch drei parallel geschaltete Phasenmodule oder Halbbrücken 130, 132, 134 gebildet. Jedes Phasenmodul besteht aus zwei in Serie geschalteten Schaltern 140, 142. An den Verbindungspunkten dieser Schalter befindet sich jeweils ein Anschluss für jede Phase 150, 152, 154. Das Eingangsklemmenpaar des Zweipunktstromrichters wird gespeist durch eine schematisch angedeutete Gleichstrom-Energiequelle 160.

Figur 2 zeigt entsprechende Serienschaltungen von identischen Modulen, wobei die drei oberen Module 201, 102, 203, zusammen einen so genannten Brückenweig 211 bilden. Eine Kombination zweier Brückenweige 211, 212 (bestehend aus einer beliebigen Anzahl von Modulen) wird dabei als Phasenmodul 213 bezeichnet. Dieses Phasenmodul ist typischerweise mit den Anschlüssen eines Gleichstromsystems bzw. eines Gleichstromzwischenkreises verbunden. Die Anzahl der Module in jedem Brückenweig definiert Spannungs- und Oberwelleneigenschaften des Stromrichters. Die

Verbindungspunkte der beiden Brückenarme jedes Phasenmoduls bilden jeweils einen Wechselstromanschluss eines Stromrichters.

Jedes Einzelmodul kann elektrisch als ein Zweipol betrachtet werden und enthält ein Energiespeicherelement sowie mehrere Schaltelemente, die für eine oder für beide Spannungsrichtungen wahlweise Strom aufnehmen oder abgeben können. Die Module können entweder nur eine Polarität der Spannung bei zwei möglichen Stromrichtungen schalten und werden dann als Zweiquadranten-Module bezeichnet; oder sie können alle vier Quadranten des Strom-Spannungs-Graphen erreichen und werden dann als Vierquadranten-Module bezeichnet.

Figuren 3a – 3c zeigen eine Grundform eines Zweipolmoduls. Die dargestellten drei Vierquadranten-Module können in ähnlicher Weise auch für die vorliegende Erfindung eingesetzt werden. Ein Vierquadranten-Modul 330 gemäß Figur 3a benötigt mindestens 4 Schalttransistoren 301 - 304. Eine solche Schaltung wird auch als Voll- oder H-Brücke bezeichnet. Je zwei der in Serie geschalteten Transistoren 301 und 302 bzw. 303 und 304 bilden eine sogenannte Halbbrücke. Parallel zu diesen Transistoren ist jeweils eine Diode 305 - 308 geschaltet, die auch jeweils die integrierte Body-Diode des jeweiligen Transistors sein kann. Im Prinzip kann für die schaltenden Elemente jede Art von steuerbarem Schalter verwendet werden. Entsprechend kann die Vollbrücke 340 allgemein durch vier Schalteinrichtungen 341 - 344 dargestellt werden, wie in Figur 3b gezeigt. Die Transistoren bzw. Schalter können die Ausgangsklemmen 310 und 311 mit dem Kondensator 309 elektrisch verbinden.

Erläutert anhand der in Figur 3a können grundsätzlich vier Zustände geschaltet werden:

- Vorgabe einer positiven Klemmenspannung in Bezug auf die beiden Klemmen 310 und 311 bei beliebiger Stromrichtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter 301 und 304;
- Vorgabe einer negativen Klemmenspannung in Bezug auf die beiden Klemmen 310 und 311 bei beliebiger Stromrichtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter 302 und 303;
- Bypasszustand (d. h. keine Energieaufnahme oder -abgabe durch das Einzelmodul), freier Stromfluss in beliebiger Richtung; erreichbar über das gleichzeitige Schalten der Transistorschalter 301 und 303 oder der Transistorschalter 302 und 304;
- 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 309 überschreitet.

Alternativ können die Module als Zweiquadranten-Module 350 ausgeführt sein, wie in Figur 3c gezeigt. In diesem Fall wird nur eine Halbbrücke bestehend aus zwei in Serie liegenden Schaltern 323 und 324 verwendet. Hierdurch können die beiden Ausgangsklemmen 320 und 321 so geschaltet werden, dass entweder eine positive Spannung an den Ausgangsklemmen anliegt oder diese in den Bypasszustand geschaltet werden. Eine Kette von Modulen kann dann entsprechend der einzelnen gewählten Schaltzustände der Module und Veränderung dieser über die Zeit entsprechend einer Treppenfunktion nahezu beliebige Spannungsverläufe abbilden, beispielsweise eine Sinuskurve.

Die Module des Modularen Multilevelconverters können je nach Anwendung für  $n$  Quellen und  $m$  Ausgänge (beispielsweise  $m=3$  für ein Dreiphasenniederspannungssystem) verschaltet werden.

Die Phasenmodule bilden die Grundbausteine eines ein oder mehrphasigen Stromrichters. So kann beispielsweise durch drei zusammengeschaltete Phasenmodule 401, 402 und 403 gemäß Figur 4 ein System zur Umwandlung einer Gleichspannung in eine 3-phasige Wechselspannung verwendet werden, wobei die Verbindungspunkte von jeweils zwei Brückenzeigen einen Anschluss 410, 411 und 412 für die drei Phasen des Drehstromsystems bilden.

In Figur 5 zeigt beispielhaft die Zusammenschaltung von 5 Phasenmodulen 501 bis 505, um eine Kopplung eines 3-phasigen Drehstromnetzes mit einem zweiphasigen Netz zu realisieren. Ein derartiges System kann beispielsweise dazu verwendet werden, ein Energienetz mit 50 Hz Wechselspannung in ein Energienetz mit 60 Hz Wechselspannung überzuführen. Hierzu würde man die drei Phasen des 50 Hz Systems über die drei Anschlüsse mit dem linken Teil der in Figur 5 gezeigten Schaltung verbinden, die hieraus eine Gleichspannung bildet, die dann über die gemeinsamen Anschlüsse dem rechten Teil der Schaltung zugeführt wird, welche hieraus eine zweiphasige Wechselspannung mit 50 Hz erzeugt. Bei dem Phasenmodul nach Figur 2, bestehend aus 2 Brückenzeigen zu je 3 Modulen kann die Betriebsspannung für jedes einzelne Modul beispielsweise 1kV betragen. Im Falle von Zweiquadrantenmodulen kann damit jedes Modul an seinen Klemmen eine Spannung von 0V oder 1kV schalten. Im Gleichstromkreis sollte daher eine Spannung von 3 kV anliegen. Damit sind sämtliche Modulkonfigurationen aller 6 beteiligten Module zugelassen, deren gesamte Serienschaltung insgesamt eine Spannung von 3 kV ergibt. Gegenüber einer fiktiven Mittelanzapfung des Gleichstromkreises würde der Ausgang des Phasenmoduls von Figur 2 damit die Zustände -1,5kV, -0,5kV, +0,5kV, 1,5kV annehmen können. Bei Einsatz von Vierquadranten-Modulen würde gemäß obigem Beispiel jedes Modul an seinen Klemmen eine Spannung von -1kV, 0kV oder 1kV schalten können. Damit kann ein solches Phasenmodul auch Spannungen ausgeben die größer sind, als die positive Spannung des Gleichstromkreises bzw. deren negative Spannung unter die negative Spannung des

Gleichstromkreises hinausreichen kann. Entsprechend kann mit einer niedrigeren Spannung im Gleichstromkreis gearbeitet werden. Allgemein ausgedrückt können bei einer Anzahl  $z$  an Modulen pro Brückenweig, über jedes Phasenmodul  $2z+1$  verschiedene stabile Spannungszustände erzeugt werden.

Die beschriebenen Modularen Multilevelconverter werden in der Regel für hohe Leistungen eingesetzt, beispielsweise in Energienetzen ähnlich dem in Bezug auf Figur 5 beschriebenen Beispiel.

Im Gegensatz dazu werden kleinere elektrische Leistungen (bis einige 100kVA) mit pulsweitenmodulierten Stromrichtern (PWM-Stromrichtern) umgewandelt, bei denen die mittleren Spannungen und Ströme durch ein geeignetes Tastverhältnis (statt der Treppenfunktion des Multilevelconverters) der geschalteten Größen erzielt werden. Die Spannung wird dabei entweder zwischen „+“ und „-“ oder jeweils zwischen „+“ und „0“ bzw. „-“ und „0“ des Gleichspannungskreises geschaltet. Man spricht entsprechend von Zweipunkt- oder Dreipunkt-Stromrichtern, da diese zwischen zwei oder drei Spannungspegeln hin- und herschalten. Eine Sinuskurve wird beispielsweise dadurch gebildet, in dem das Tastverhältnis ausgehend von 0 stetig ansteigt, um im Bereich des Maximums der Sinuskurve das maximale Tastverhältnis zu zeigen. Von dort nimmt das Tastverhältnis wieder ab und erreicht beim Nulldurchgang den Wert 0 und beim maximalen negativen Wert des Sinus das maximale Tastverhältnis mit negativer Spannung (Dreipunkt-Stromrichter), bzw. erreicht den Wert 0 beim maximal negativen Wert des Sinus (Zweipunkt-Stromrichter). Diese Art von Stromrichtern erzeugt allerdings - ähnlich wie Thyristor-basierte Stromrichter - durch die hochfrequenten Schaltvorgänge und stets gleichbleibend hohe Amplitude der Pulse ein sehr hohes Maß an Oberschwingungen, was eine aufwändige Filterung der Ein- und Ausgänge erforderlich macht. Beispielsweise wird typischerweise eine Schaltfrequenz von 50 kHz benötigt, um einen Sinusverlauf von 50 Hz nachzubilden. Bei sehr hohen Spannungen (und damit auch hohen Leistungen) stehen hinsichtlich der Bauteile einerseits nicht die notwendigen Spannungsfestigkeiten zur Verfügung; andererseits steigen auch die Schaltverluste und der Filteraufwand stark an.

Herkömmliche Modulare Multilevelconverter (MMC) bieten in dieser Beziehung große Vorteile, weisen jedoch für kleinere und mittlere Leistungen (z.B. 100 VA bis 1 MVA) folgende Nachteile auf:

- Um einen hinreichend fein gestuften Spannungsverlauf zu erzeugen ist bei MMCs eine große Anzahl von Modulen notwendig (für z.B. insgesamt 50 Spannungsstufen sind 100 Module pro Phase notwendig).

- Diese große Anzahl von Modulen ist unabhängig von der geschalteten Leistung und somit fallen hohe Kosten auch dort an, wo nur geringe Leistungen geschaltet werden. Für viele Anwendungen sind damit die Kosten zu hoch.
- Da jedes Modul beim MMC einzeln anzusteuern und zu versorgen ist, ist der hierfür erforderliche Elektronikaufwand insbesondere bei kleinen Leistungen überproportional, wodurch solche Anlagen sehr teuer werden.
- bei kleinen Frequenzen des zugehörigen Wechselstromsystems sind hohe Kapazitäten für die Modulkondensatoren erforderlich, um die Spannungsstufen entsprechend lange halten zu können. Während dies bei Netz-Stromrichtern keinen besonderen Nachteil darstellt, macht sich diese Eigenschaft im Bereich Motor-Stromrichter, beispielsweise solchen, die in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, besonders nachteilig bemerkbar. Die Dimensionierung müsste die niedrige Frequenz vom regelmäßig wiederkehrenden Motoranlauf berücksichtigen.

#### ÜBERSICHT ÜBER DIE ERFINDUNG

Es ist Aufgabe der Erfindung, einen Stromrichter, sowie ein entsprechendes Verfahren bereitzustellen, welcher die obigen Nachteile nicht aufweist.

Gemäß einem ersten Aspekt betrifft die Erfindung einen modularen Stromrichter, welcher aus mindestens einem aktiv zu versorgenden Hauptmodul und einer beliebigen Anzahl von N-1 weiteren Modulen aufgebaut ist. Alle Module sind miteinander seriell verschaltet (z.B. über Modulklemmen, wobei der Begriff Modulklemme auch jede andere Art elektrischer Verbindung und insbesondere Steckverbindungen umfassen soll). Jedes Modul weist Schalteinrichtungen sowie mindestens eine Energiespeichereinrichtung auf, wodurch das einzelne Modul in der Lage ist, mit einer einstellbaren Spannung aufgeladen zu werden. Die Schalteinrichtungen, die vorzugsweise durch Transistoren realisiert werden, gestatten eine Verschaltung des Moduls gemäß eines aktiven Betriebs in Bezug auf die Serienschaltung oder gemäß eines Bypass-Betriebs, bei dem das betreffende Modul quasi überbrückt wird und somit nicht zum Spannungspfad der Serienschaltung beitragen kann. Die Ausgangsspannung des Stromrichters wird an den Endpunkten der Serienschaltung abgegriffen. Das Abgreifen erfolgt somit vorzugsweise an den entsprechenden Ausgangsklemmen, wobei der Begriff Ausgangsklemmen jede Art von elektrischer Anschlussmöglichkeit umfasst. Das Hauptmodul wird von einer Gleichspannungsquelle gespeist, sodass das Hauptmodul durch diese Gleichspannungsquelle auf einem im Wesentlichen konstanten Spannungsniveau gehalten wird, welches Spannungsniveau von dem Hauptmodul im aktiven Betrieb an den Spannungspfad abgegeben werden kann. Das Hauptmodul verfügt vorzugsweise über eine Speichereinrichtung, wie beispielsweise einen Kondensator, jedoch ist diese aufgrund der

Speisung mit einer Gleichspannungsquelle nicht zwingend erforderlich. Im Ergebnis kann jedes Modul mit der an seiner Speichereinrichtung vorherrschenden Spannung zur Gesamtspannung des Spannungspfad beitragen (aktiver Betrieb) oder nicht (Bypass-Betrieb). Der entsprechende Betrieb ist über die jeweiligen Schalteinrichtungen einstellbar.

Diese von den einzelnen Modulen abzugebenden Spannungsbeiträge sind zueinander unterschiedlich. Vorzugsweise sind die Spannungsbeiträge untereinander gemäß Zweierpotenzen abgestuft, jedoch sind auch andere Abstufungen, wie Dreierpotenzen oder nicht exponentielle Verhältnisse möglich. Da nur das Hauptmodul (oder die Hauptmodule), welches nicht zwingend das erste Modul der Serie sein muss, mit Gleichspannung versorgt wird, erfolgt die Aufladung der anderen Module über die serielle Verschaltung mit dem Hauptmodul. Da somit eine Vielzahl unterschiedlicher Spannungsstufen, wie beispielsweise  $U_0/0$ ,  $U_0/2$ ,  $U_0/4$ ,  $U_0/8$ ,  $U_0/16$  etc., vorhanden sind, kann mit diesen Teilspannungen (im Rahmen der insgesamt erreichbaren Spannungsstufen) in jedem Zeitpunkt jede beliebige zu erzielende Ausgangsspannung entsprechend einem gewünschten Ausgangsspannungsverlauf dargestellt werden. Die Module die mit ihren Teilspannungen oder Spannungsbeiträgen für den Aufbau der gewünschten Ausgangsspannung benötigt werden, werden dafür in den aktiven Betrieb geschaltet, die nicht benötigten Module in den Bypass-Betrieb, sodass insgesamt die gewünschte Ausgangsspannung erzielt wird. Es kann somit, beispielsweise ausgehend von einer Staffelung nach Zweierpotenzen, mit einer relativ geringen Anzahl von Modulen eine große Anzahl resultierender Spannungsstufen dargestellt werden, im Beispiel entsprechend dem Binärprinzip.

Gemäß einem bevorzugten Aspekt der vorliegenden Erfindung sind die Schalteinrichtungen der Module so beschaffen, dass das Modul nicht nur seriell in den Spannungspfad sondern auch anti-seriell verschaltet werden kann, sodass zusätzlich ein invertierter Betriebszustand ermöglicht wird. Damit kann ein bestimmtes Modul mit seiner Klemmspannung invertiert auf den Spannungspfad, beispielsweise mit  $-U_0/4$  wirken. Dieser invertierte Betrieb ermöglicht eine Vergrößerung der Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Spannungsbeiträge und ermöglicht es insbesondere, eine bestimmte gewünschte Ausgangsspannung durch jeweils mindestens zwei oder mehr unterschiedliche Modulkonfigurationen bzw. Modulbetriebsartverschaltungen darzustellen. Die invertierte Betriebsart eines Moduls hat den Vorteil, dass die betreffende Speichereinrichtung, vorzugsweise Kondensator, auf diese Weise während des Betriebs nachgeladen werden kann. Wenn ein Modul mit seinem Spannungsanteil zum Spannungspfad beiträgt, wird die entsprechende Speichereinrichtung aufgrund des Laststroms entladen. Im invertierten Betrieb führt der Laststrom jedoch zu einer Ladung des betreffenden Moduls, sodass sich der resultierende Spannungsbereich dieses Moduls auf diese Weise in vorbestimmten Grenzen halten lässt. Wenn der Ladezustand an

einer Speichereinrichtung eines Moduls unter einen Grenzwert  $W_1$  zu fallen droht, wird dieses Modul in einer nachfolgenden Phase in den invertierten Betrieb geschaltet, wodurch sich die Speichereinrichtung wieder auflädt (dabei darf es vor dieser nachfolgenden Phase vorher noch durchaus im Bypass-Betrieb geschaltet sein). Diese Aufladung erfolgt dann bis zum Grenzwert  $W_2$ , wobei zu diesem Zeitpunkt das Modul dann entweder wieder in einen Entladungsbetrieb, d.h. aktiven Betrieb geschaltet werden muss oder in den Bypass-Betrieb, um ein Überladen zu verhindern. Auf diese Weise kann jede Speichereinrichtung jedes Moduls in einem vorgegebenen Spannungsbereich gehalten werden. Dieser kann elektrisch gesehen unabhängig von der tatsächlichen Speicherkapazität des Moduls sein. Die Verwendung kleinerer Kapazitäten wird somit häufigere Schaltvorgänge erfordern, als bei der Verwendung größerer Kapazitäten, da eine Nachladung zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen muss. Die Kapazitäten der einzelnen Module können gleich ausgelegt sein, obwohl die Module unterschiedliche Spannungsbeiträge liefern sollen. Sie können jedoch auch auf die ihnen zugewiesene Spannungsstufe abgestimmt sein. Dies alles ist jedoch bei der Steuerung der Betriebsartumschaltungen zu berücksichtigen. Der Spannungsbereich auf dem ein bestimmtes Modul gehalten wird, beispielsweise die Spannung  $U_0/4 \pm \Delta$  wird im Wesentlichen durch das gezielte Schalten des Moduls über die Schalteinrichtungen in entweder aktiven oder Bypass-Betrieb bzw., falls vorhanden, invertierten Betrieb erreicht. Wenn jeweils mehr als eine Modulkonfiguration vorhanden ist, um eine bestimmte Ausgangsspannung darstellen zu können, so ermöglicht diese Redundanz, dass Module die nachzuladen sind, in einem der nächsten Zyklen bedarfsweise in den invertierten Betrieb gesetzt werden und insgesamt dennoch eine im wesentlichen gleichbleibende Ausgangsspannung darstellbar ist.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung übernimmt die Steuerung der Schalteinrichtungen der Module eine Controller-Einrichtung, welche vorzugsweise alle Module gleichzeitig schaltet und welche verantwortlich ist für die Erfassung der aktuellen Ladezustände der Module und die Auswahl der geeigneten Betriebseinstellung für jedes Modul. Aufgrund des Zusammenspiels der Controller-Einrichtung mit dem Stromrichter ist es somit möglich, einen gewünschten Ausgangsspannungsverlauf über die Zeit abzubilden. Aufgrund der Möglichkeit bei diesem Aspekt der Erfindung ein bestimmtes Ausgangsspannungsniveau trotz Umschaltung von einer Modulkonfiguration auf eine andere Modulkonfigurationen auf einem gleichbleibenden Niveau zu halten (wodurch ermöglicht wird, dass Module die an eine Ladeuntergrenze kommen im nachfolgenden invertierten Betrieb wieder aufgeladen werden, ohne dass sich dadurch die Gesamtausgangsspannung ändern muss), ermöglicht nicht nur die Abbildung von sich verändernden Ausgangsspannungsverläufen, beispielsweise periodischen Verläufen, sondern auch die Darstellung von Gleichspannung im Ausgangskreis. Dieses Verhalten ist insbesondere für

Anwendungen interessant, bei denen sehr langsame Stufenwechsel von einem Ausgangsniveau zum nächsten Ausgangsniveau über die Zeit stattfinden sollen und somit die Ausgangsspannung über einen gewissen Zeitraum in einer Spannungsstufe (z.B. Binärstufe) verharren soll.

Vorzugsweise werden für die Module sogenannte Vierquadrantenmodule verwendet, wobei auch andere Schaltungsarten, beispielsweise Zweiquadrantenmodule, möglich sind, insbesondere für das Hauptmodul.

Gemäß einem weiteren Aspekt ermöglicht der erfindungsgemäße Stromrichter auch eine Energieumkehrung bei dem von der Ausgangsseite Energie in die Gleichspannungsquelle, die das Hauptmodul speist, eingebracht wird. In dieser Betriebsart fließt der Laststrom zeitweise in entgegengesetzter Richtung, was dazu führt, dass sich das Vorzeichen im Bezug auf das Ladungsverhalten der Speichereinrichtungen der Module umkehrt. Beispielsweise wird dann ein Modul, das sich im invertierten Betrieb befindet, nicht mehr geladen, sondern entladen. Diese Zusammenhänge sind durch die Controller-Einrichtung, welche die Betriebszustände der Module schaltet, zu berücksichtigen.

Die Controller-Einrichtung kann zentral ausgelegt sein oder dezentral. Insbesondere ist es möglich, dass es eine zentrale Controller-Einrichtung gibt, jedes Modul aber jeweils zusätzlich über eine lokale Controller-Einrichtung verfügt, welche das Schalten der Schalteinrichtung im Modul bewirkt und den aktuellen Ladezustand der Speichereinrichtung erfasst und an die zentrale Controller-Einrichtung meldet.

Gemäß einem weiteren Aspekt wird der erfindungsgemäße Stromrichter ohne Controller-Einrichtung bereitgestellt und verfügt somit im Wesentlichen über die erwähnte Modulkette oder Modulketten. Für den späteren Betrieb kann er mit einer externen Controller-Einrichtung gekoppelt werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt ist der erfindungsgemäße Stromrichter für mehrphasige Systeme ausgelegt und verfügt dann über mehrfache Modulketten. Beispielsweise kann der Stromrichter über drei Modulketten verfügen, wenn er zur Ansteuerung eines dreiphasigen Elektromotors vorgesehen ist. Für derartige mehrphasige Systeme kann es vorteilhaft sein, daraufhin angepasste Schalteinrichtungen in den Modulen vorzusehen, insbesondere Mehrphasenmodule.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Hauptmodul mit einer Gleichspannung  $U_0$  gespeist und im Falle von einphasigen Systemen führt dies zu Ausgangsspannungen im Bereich zwischen  $+U_0$  und  $-U_0$ . Für den Fachmann ist jedoch klar, dass zumindest kurzzeitig auch Ausgangsspannungen dargestellt werden können, die im Bereich von fast  $+2U_0$  und  $-2U_0$

liegen. Insbesondere werden diese Maximalspannungen dadurch erreicht, indem alle Module in den aktiven Betrieb geschaltet werden ( $U_0 + \frac{1}{2} U_0 + \frac{1}{4} U_0 + \frac{1}{8} U_0$  etc.) oder alle in den invertierten Betrieb ( $-U_0 - \frac{1}{2} U_0 - \frac{1}{4} U_0 - \frac{1}{8} U_0$  etc.).

Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Betreiben eines Stromrichters gemäß dem N Module in Serie verschaltet werden, eine Gleichspannung  $U_0$  an die Eingangsklemmen des Hauptmoduls angelegt wird, ein gewünschter zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung im Bezug auf die Amplitude über die Zeit vorgegeben wird, eine Ausgangsspannung an den beiden Endpunkten der Serienschaltung der Module abgegriffen wird und vorbestimmte Ladungszustände für die einzelnen Module aufrecht erhalten werden, indem jedes Modul in seinem aktiven Betriebszustand im Wesentlichen einen vorgegebenen Spannungsbeitrag zur Serienschaltung leistet, wobei die Spannungsbeiträge der Module unterschiedlich zueinander sind und vorzugsweise entsprechend Zweierpotenzen gegeneinander abgestuft sind, und indem die Schaltungseinrichtungen der Module angesteuert werden, um jedes Modul jeweils in einen Betriebszustand zu schalten, derart, dass die Summe der einzelnen Modulspannungen wie sie durch die Energiespeichereinrichtung jedes Moduls entsprechend seines aktiven, invertierten oder Bypass-Betriebs bereitgestellt wird, in jedem Zeitpunkt dem vorgegebenen Bereich der zu liefernden Ausgangsspannung entspricht.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung werden die erfindungsgemäßen Stromrichter für AC/AC-Betrieb durch Koppeln zweier derartiger Stromrichter über den Gleichstromkreis verwendet. Auf diese Weise kann beispielsweise ein Stromrichter aufgebaut werden, der zwei AC-Systeme mit unterschiedlichen Spannungen und/oder unterschiedlichen Frequenzen und/oder unterschiedlichen Phasenzahlen miteinander verbindet und so einen bidirektionalen Energieaustausch zwischen diesen Systemen ermöglicht. Gemäß einem weiteren bevorzugten Aspekt wird ein erfindungsgemäßer Stromrichter zur Speisung eines Elektromotors eines Elektrofahrzeuges verwendet. Gemäß einem weiteren bevorzugten Aspekt wird der erfindungsgemäße Stromrichter zur Verbindung von typischen Netzdrehspannungen mit einem Gleichstromnetz verwendet, um so beispielsweise Hausanschlüsse an ein lokales Gleichstromnetz anzubinden.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

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

- Fig. 1 das Prinzip eines dreiphasigen Zweipunktstromrichters beschreibt;
- Fig. 2 ein Phasenmodul eines herkömmlichen modularen Multilevelconverters zeigt, welches aus zwei Brückenzeigen mit je drei gleichen Zweipolen aufgebaut ist;
- Fig. 3a - c den prinzipiellen Aufbau eines Vierquadranten-Moduls bzw. eines Zweiquadranten-Moduls wie er auch für die vorliegende Erfindung eingesetzt werden kann;
- Fig. 4 ein System zur Umwandlung einer 3-phasigen Wechselspannung in eine 1-phasige Wechselspannung bzw. eine Gleichspannung zeigt, welches aus drei zusammenschalteten Phasenmodulen besteht;
- Fig. 5 ein System zur Kopplung eines 3-phasigen Drehstromnetzes mit einem zweiphasigen Netz zeigt, welches aus drei und zwei zusammenschalteten Phasenmodulen besteht;
- Fig 6a ein Prinzipschaltbild zur Erläuterung des Grundprinzips der vorliegenden Erfindung anhand einer bevorzugten Ausführungsform zeigt;
- Fig. 6b - d den prinzipiellen Aufbau einer einphasigen Stromrichterschaltung gemäss einem Aspekt der Erfindung zeigt, bestehend aus beispielhaft 4 Modulen zeigt;
- Fig. 7 eine Illustration möglicher Spannungskombinationen durch aktivierte Module für eine einphasige Stromrichterschaltung, bestehend aus beispielhaft 4 Modulen ähnlich zu Figur 6 zeigt;
- Fig. 8a - b Illustrationen möglicher gestufter Verläufe einer Wechselspannung zeigt, wie sie gemäß Aspekten der Erfindung erzeugt werden können;
- Fig. 9 das Prinzip einer Versorgung eines dreiphasigen Verbrauchers mit getrennten, isolierten Anschlüssen über drei einphasige Vorrichtungen gemäss einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung zeigt;
- Fig. 10 eine erste Ausführungsform eines aktiv versorgten Moduls für drei Phasen eines mehrphasigen Stromrichters gemäss einem weiteren Aspekt der Erfindung zeigt;
- Fig. 11 eine zweite Ausführungsform eines aktiv versorgten Moduls für eine Phase eines mehrphasigen Stromrichters gemäss einem weiteren Aspekt der Erfindung zeigt;
- Fig. 12 mögliche Schaltzustände und die erzeugten Ausgangsspannungen der zweiten Ausführungsform für eine Phase innerhalb eines mehrphasigen Stromrichters zeigt;

- Fig. 13 eine dritte Ausführungsform eines aktiv versorgten Moduls für eine Phase innerhalb eines dreiphasigen Stromrichters gemäss einem weiteren Aspekt der Erfindung zeigt;
- Fig. 14 eine Illustration zum Funktionsprinzip anhand einer Schaltung mit zwei Modulen zur Erzeugung und dem Zeitverlauf einer eingestellten Gleichspannung zeigt;
- Fig. 15 eine Illustration zum Funktionsprinzip anhand einer Schaltung mit drei Modulen zur Erzeugung und Zeitverlauf einer eingestellten Gleichspannung zeigt;
- Fig. 16 eine Illustration einer Stufenfunktion mit einem vergrößerten Ausschnitt zur Erzeugung einzelner Spannungsstufen zeigt;
- Fig. 17 Abfolgen von Schaltstufen zeigt, wie sie zur Erzeugung eines Stufenspannungsverlaufes benötigt werden.

In den Zeichnungen bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Teile, Bauteile und Anordnungen.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

##### Grundlegende Aspekte:

Die Erfindung basiert gemäß einem Aspekt auf der Erkenntnis Stromrichter für jede Phase durch eine Serienschaltung modularer Zweipole zu realisieren, wobei die Zweipole hinsichtlich ihrer Klemmenspannung vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen gestaffelt abgestimmt sind, derart dass sich bei  $n$  Modulen  $2^{(n-1)}$  Spannungsstufen an den Enden der Serienschaltung darstellen lassen. Vorzugsweise wird dabei das Modul mit der höchsten Spannungsstufe mit dem Gleichspannungskreis verbunden.

Vorzugsweise sind die einzelnen Module als Vierquadranten-Module aufgebaut, wobei die Verwendung von Zweiquadranten-Modulen ebenfalls möglich ist. Vorzugsweise wird die Klemmenspannung jedes Moduls durch direktes oder indirektes Messen dieser und entsprechendes Laden oder Entladen eingestellt, welches wiederum über entsprechendes Schalten der jeweiligen Transistoren (oder anderer geeigneter Schalteinrichtungen) bewirkt wird.

Obwohl eine bevorzugte Ausführungsform von einer strengen Staffelung der Module in Serie entsprechend ihrer maximalen Klemmenspannung ausgeht, um dadurch den Bauteileaufwand, insbesondere für den Modulkondensator effizient zu gestalten (das Modul mit der höchsten Klemmenspannung verwendet den Kondensator mit der höchsten Spannungsfestigkeit), kann die Reihenfolge gemäß einem Aspekt der Erfindung beliebig gewählt werden (solange die Spannungsfestigkeiten der einzelnen Kondensatoren nicht

überschritten wird) und diese Reihenfolge kann während des Betriebes von einer Controller- oder Steuereinrichtung, die hierfür ausgelegt ist, verändert werden. Beispielsweise kann beim Ausfall eines Moduls dessen Wertigkeit von der Steuerung auf den kleinsten möglichen Binärwert gesetzt werden, wodurch sich der Ausfall dieses Moduls nur in einer geringen Verschlechterung der Stufigkeit bemerkbar machen würde.

Vorzugsweise definiert somit der Aufbau eines einzelnen Moduls nicht zwingend die an ihm maximal einstellbare Klemmenspannung; diese wird stattdessen durch eine übergeordnete Steuerung oder Controller-Einrichtung, die das aktuelle Potential erfassen kann durch entsprechendes Auf- und Entladen eingestellt. Das Erfassen der aktuellen Klemmenspannung an einem Modul kann direkt an diesem erfolgen (direktes Messen), oder quasi übergeordnet (indirektes Messen) durch Messung nur der gesamten Klemmenspannung der Serienschaltung unter Berücksichtigung zumindest der aktuellen Schaltzustände und vorzugsweise vorangegangener Schaltzustände. Vorzugsweise können dabei die Spannungsveränderungen der Modul-Kondensatoren über den Strom, der durch die Serienschaltung fließt und deren Kapazität mit berücksichtigt werden.

Die Erfindung basiert gemäß einem weiteren Aspekt auf der Erkenntnis, dass ein Stromrichter, der aus einer Serienschaltung von mehreren als Zweipole fungierenden Einzelmodulen aufgebaut werden soll, so auszuführen ist, dass die Spannungen dieser Einzelmodule unterschiedliche Werte, vorzugsweise gestaffelt nach Zweierpotenzen aufweisen sollen. Die Einzelmodule sollen dabei Energiespeicherelemente enthalten und weiterhin so beschaffen sein, dass sie an ihren jeweiligen beiden Klemmen jeweils die Spannung des Energiespeicherelementes ausgeben, deren invertierte Spannung ausgeben oder in einen Bypass-Modus (Spannungsabfall 0) geschaltet werden, bei dem eine leitende Verbindung zwischen den Klemmen hergestellt wird, ohne das Energiespeicherelement zu laden oder zu entladen. Auf diese Weise bewirkt die Hintereinanderschaltung der Einzelmodule über das entsprechende Aktivieren, Deaktivieren/Bypass-Modus und Umpolen/Invertieren der Energiespeicherelemente eine sehr fein gestufte Anpassung der Ausgangsspannung und somit des gewünschten Spannungsverlaufs und ermöglicht es gleichzeitig, die Energiespeicherelemente der Module wahlweise zu laden oder zu entladen.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ermöglicht die Abstufung der gewählten Spannungen der Module, dass es für jede an den Klemmen der Serienschaltung auszugebende Spannungsstufe vorzugsweise immer mindestens zwei Modulkonfigurationen gibt, so dass die Energiespeicherelemente der jeweiligen Module wahlweise ge- oder entladen werden können. Mit anderen Worten und ausgedrückt für den Betriebszustand einer Leistungsabgabe durch die Serienschaltung an eine Last soll dadurch das Wiederaufladen eines Moduls in der invertierten Verschaltung ermöglicht werden, obwohl das gleiche Modul in einem vorausgehenden Schaltzustand aktiv verschaltet war und dabei entladen wurde. Dies

ist wichtig, da im Bypass-Modus bzw. deaktivierten Modus eine Nachladung nicht erfolgen kann.

Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird eine Gleichstromversorgung so an ein spezielles Modul gekoppelt, dass dieses spezielle Modul wahlweise an seinen Klemmen die Spannung der Gleichstromversorgung, einen Bypass-Zustand oder optional die invertierte Spannung der Gleichstromversorgung liefert. Die in Serie zu diesem speziellen Schaltmodul liegenden weiteren Einzelmodule bilden zusammen mit diesem speziellen Modul eine Phase eines ein oder mehrphasigen Stromrichters, wobei die Enden dieser Serienschaltung die äußeren Anschlüsse für jeweils eine Phase darstellen. Dieser Aspekt ermöglicht den Aufbau von Stromrichtern, die sich grundlegend von herkömmlichen Stromrichtern mit zwei Brückenzeigen entsprechend Figur 2 unterscheiden. Mit anderen Worten bildet das spezielle Modul selbst bereits eine Phase eines Zwei- oder Dreipunktstromrichters, während die zusätzlichen Module der Serie passiv zugeschaltet sind und – soweit nicht in den Standby-Modus geschaltet – vom Strom durch die Serienschaltung versorgt werden und weiterhin die Anzahl darstellbarer Spannungsstufen erhöhen.

Figur 6a zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Stromrichters gemäß diesem Aspekt der Erfindung. Der Stromrichter wird gebildet durch eine Kette aus  $n$  seriell miteinander verschalteten Modulen 602. Die Module stellen aus elektrischer Sicht Zweipole dar. Vorzugsweise sind zumindest bis auf das oberste Hauptmodul alle  $n-1$  Module gleich aufgebaut. Das Hauptmodul weist Klemmen zum Anlegen einer Gleichspannung  $U_0$  auf. Die Module weisen im Inneren Schalteinrichtungen, vorzugsweise gebildet durch Transistoren 620, auf. Diese Schalteinrichtungen werden durch eine Controller-Einrichtung 604 gesteuert. Diese Steuerung kann wie gezeigt zentral erfolgen. Alternativ oder zusätzlich kann jedes Modul über eine eigene Steuereinrichtung verfügen. Jedes Modul verfügt darüber hinaus über eine Speichereinrichtung, wie beispielsweise einen Kondensator 606. Durch das Zusammenspiel mit der Controller-Einrichtung wird der Ladungszustand zumindest jedes der  $n-1$  weiteren Modulkondensatoren erfasst bzw. gemessen und dadurch überwacht. Durch davon abhängiges Schalten der Schalteinrichtungen der Module zu bestimmten Zeitpunkten kann für jedes Modul die von ihm im aktiven Zustand in den Spannungspfad abgegebene Modulspannung in einem gewünschten Bereich gehalten werden. Erfindungsgemäss sind die Modulspannungen der einzelnen Module unterschiedlich. Vorzugsweise hat ausgehend vom Hauptmodul mit der Spannung  $U_0$  jedes weitere  $n-1$  Modul eine dagegen stufenweise verkleinerte Spannung. Vorzugsweise sind die Modulspannungen wie angegeben entsprechend Zweierpotenzen zueinander gestaffelt. Den Ausgang bildet die Spannung an den Endpunkten der Serienschaltung.

Jedes Modul kann in den aktiven Betrieb geschaltet seine Modulspannung in den Spannungspfad einbringen. Im Betrieb Bypass wird das Modul durchgeschaltet und seine

Modulspannung wird nicht in den seriellen Spannungspfad eingebracht, Geschaltet in einen vorzugsweise vorgesehenen invertierten Betrieb kann jedes Modul seine Spannung invertiert in den Spannungspfad einbringen. Für den Fachmann ist klar, dass es dadurch eine grosse Anzahl von darstellbaren Spannungsstufen am Ausgang gibt, erzielbar durch eine geringe Anzahl von Modulen. Das Schalten des invertierten Betriebs ermöglicht es die Speichereinrichtung des entsprechenden Moduls nachzuladen.

Weitere Details sind anhand der weiteren Figuren beschrieben, wobei zur Vereinfachung die Controller-Einrichtung teilweise nicht eingezeichnet ist.

Das von der Gleichstromversorgung gespeiste spezielle Modul oder Hauptmodul stellt vorzugsweise das Modul mit der höchsten Spannungsfestigkeit dar und kann als aktiv versorgtes Modul (bzw. Hauptmodul) betrachtet werden. Die weiteren in Serie geschalteten Einzelmodule können dabei wie Vierquadranten-Module 330, 340 eines Modularen Multilevelconverters ausgeführt sein, wie sie in den Figuren 3a und 3b dargestellt sind. Als Transistoren sind hier beispielsweise MOSFETs oder IGBTs einsetzbar. Anstelle der dargestellten Transistoren 301 bis 304 können auch andere elektrisch schaltende Bauelemente als Transistoren zum Einsatz kommen, wie beispielsweise GTOs oder IGCTs. Weiterhin können parallel zu den schaltenden Bauelementen noch Dioden so parallel geschaltet sein, dass diese in entsprechender Durchlassrichtung des schaltenden Bauelementes sperren.

Die spezielle Verschaltung gemäß Figur 3a und 3b gestattet es, dass jedes einzelne Energiespeicherelement der Serienschaltung entweder positiv oder negativ in Serie zu der Spannungsquelle geschaltet wird oder in Form einer Bypass-Schaltung nicht beteiligt ist. Damit sind ausgewählte Energiespeicherelemente (wie beispielsweise Kondensatoren) der Serienschaltung mit unterschiedlichen Spannungen seriell bzw. antiseriell zur Spannungsquelle geschaltet. Die beiden Anschlüsse an den Enden einer so gebildeten Kette werden als Ausgang des Systems betrachtet. Wegen des bidirektionalen Leistungsflusses können sie aber ebenso als Eingänge der Schaltung fungieren.

Die Energiespeicherelemente sind vorzugsweise Ladungsspeicher, wie Kondensatoren oder Batterien, die keine zusätzliche Versorgung nach außen benötigen. Weiterhin können aber auch andere Energiespeicherelemente, wie beispielsweise Doppelschicht-Kondensatoren oder Lithium-Ionen-Kondensatoren verwendet werden. Durch die Serienschaltung dieser Energiespeicherelemente mit der aktiv versorgten Modulen und einer Last kann das System Ladung von den aktiv versorgten Modulen – je nach aktuell gewählter Polarität im Modul – in die Energiespeicherelemente transportieren, oder aus ihnen herausleiten. Insbesondere können so – bei entsprechender Wahl der Spannungen der Speicherelemente und ihrer Verschaltung – an den Ausgangsklemmen der Serienschaltung Spannungen  $-U_0 \leq U \leq U_0$

erzeugt werden, wobei  $U_0$  die Spannung des aktiv versorgten Moduls darstellt (dieser Bereich gilt zumindest dann, wenn eine Nachladung einzelner Module möglich sein soll; ohne diese Forderung wäre kurzzeitig auch nahezu der doppelte Spannungshub möglich). Die Spannung an den Ausgangsklemmen ist also die Summe der Teilspannungen der aktiv geschalteten Module, also der Module, welche sich nicht im Bypassbetrieb befinden. Da insbesondere die nicht versorgten Module als Vierquadranten-Module ausgeführt sind, können deren Spannungs-Beiträge auch negativ sein. Aus den Eigenschaften des aktiv versorgten Moduls ergeben sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten für die Serienschaltung der Module:

- das aktiv versorgte Modul ist als Zweiquadranten-Modul ausgeführt; in diesem Fall kann es nur eine positive Spannung  $U_0$  oder  $0V$  ausgeben. Entsprechend ergibt sich an den Ausgangsklemmen der Serienschaltung auch nur eine gestufte Spannung zwischen  $0V$  und  $U_0$ , da Summe der Spannungsbeiträge der weiteren Module negativ ist, solange die Spannung am aktiv versorgten Modul  $U_0$  ist. Bei dieser Variante können die anderen Module als Vierquadranten- oder Zweiquadranten-Module ausgeführt sein.
- das aktiv versorgte Modul ist als Vierquadranten-Modul ausgeführt; in diesem Fall kann es eine positive Spannung  $U_0$ , eine negative Spannung  $-U_0$  oder  $0V$  ausgeben. Entsprechend kann an den Ausgangsklemmen eine gestufte Spannung zwischen  $-U_0$  und  $U_0$  - und damit auch ein echter Wechselspannungsverlauf ausgegeben werden. Bei dieser Variante sollten die anderen Module ebenfalls als Vierquadranten -Module ausgeführt sein.

Der Strom an den Ausgangsklemmen des Systems (der ein Laststrom oder der Strom einer Quelle sein kann) erzeugt einen Ladungstransport durch sämtliche Module, welcher wiederum die Spannungen der einzelnen aktiven Energiespeicherelemente mit der Zeit verändert. Die Spannung eines Kondensators (der als Energiespeicherelement eines Moduls dient) fällt mit der Zeit ab, wenn dieser Kondensator - entsprechend der aktuell gewählten Polarität - seriell mit der Spannungsquelle verbunden ist, bzw. seine Spannung steigt an, wenn er antiseriell mit der Quelle verbunden ist.

Durch entsprechendes ständiges Umschalten der Energiespeicherelemente aller beteiligten Module (bis auf das Modul mit der höchsten Spannungsfestigkeit) im Betrieb kann für jedes Energiespeicherelement seine mittlere Ladung und damit auch seine Spannung erhalten werden. Insbesondere können für solche Umschaltvorgänge die zu aktivierenden Module so gewählt werden, dass ein Umpolen der Energiespeicherelemente einerseits die Ladung jedes Energiespeicherelements in der gewünschten Weise ausgleicht (so dass sein Spannungswert etwa erhalten bleibt) und andererseits auch die gewünschte Gesamtspannung der Serienschaltung der Module aufrechterhalten bleibt. Auf diese Weise können daher durch

ständiges periodisches Umschalten, auch am Ausgang des Systems nahezu konstante Gleichspannungen dargestellt, bzw. in kleinen Stufen verändert werden.

Das Ändern der Ausgangsspannung durch Änderung der Konfiguration aktiv geschalteter Module geschieht sehr verlustarm, da nur die Durchlassverluste der Transistoren der Module, die ohmschen Verluste der Energiespeicherelemente und evtl. noch Schaltverluste der Transistoren anfallen.

Für die Abstufung der Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente zeigt sich, dass eine Abstufung in Zweierpotenzen besonders vorteilhaft ist. Damit ist das Energiespeicherelement mit der größten Spannung auf eine Spannung von  $U_0$  ausgelegt; für die weiteren Speicherelemente halbiert sich jeweils die Spannung. Diese Auslegung hat den Vorteil, dass mit relativ wenigen Energiespeichern nach der oben beschriebenen Methode eine große Zahl äquidistanter Spannungsstufen erzeugt werden kann. Wenn man die Zuführungen der Spannungsquelle als Gleichstromzwischenkreis betrachtet, das aktiv versorgte Modul beispielhaft als Vierquadranten-Modul auslegt und die Ausgangsklemmen als AC-Kreis betrachtet (auch wenn das System wahlweise auch Gleichspannungen erzeugen kann), bildet das so entstehende System einen einphasigen Stromrichter.

#### Einphasiges System:

Obige Grundlagen gelten sinngemäß für die weiteren Erläuterungen die sich zunächst auf ein einphasiges System richten.

Einphasige Systeme als eine bevorzugte Ausführungsform werden beispielsweise benötigt, um aus einer Gleichspannungsquelle einen einphasigen Wechselstrom, beispielsweise 230V/50Hz zu erzeugen. Eine mögliche Anwendung besteht im Bereich Photovoltaik. Ein Energiespeicher wird über die Zeit mittels Photovoltaik-Panels aufgeladen und soll zur Versorgung eines Systems, beispielsweise eines Hauses dienen. Das System Haus benötigt typischerweise 230V/50Hz. Der Stromrichter ist dabei in der Lage diese Wandlung zwischen Energiespeicher und Hausnetz zu bewerkstelligen.

Figur 6b zeigt beispielhaft und schematisch ein solches System bestehend aus vier Modulen, welche jeweils als Vierquadranten-Module ausgelegt sind. Für den Fachmann und insbesondere auch aus den obigen Ausführungen ist klar, dass eine beliebige Anzahl von Modulen vorhanden sein kann und diese über beliebige Arten von Schalteinrichtungen geschaltet sein können. Sie können vorzugsweises als Zweiquadranten- oder Vierquadranten-Module ausgelegt sein. Ein einphasiger Stromrichter 610, besteht aus vier Modulen 640, 650, 660, 670, wobei jedes Modul symbolisch mit vier Schaltern dargestellt ist. Modul 640 stellt das aktiv versorgte Modul dar. Die nach unten folgenden seriell verschalteten Module 650, 660, 670 sind sämtlich als passive Vierquadranten-Module mit je einem Speicherkondensator 652, 662, 672 ausgeführt, wobei sich die Spannungen der Module 650, 660, 670 jeweils erneut

halbiert, wie in Figur 6a angegeben. Bei den dargestellten vier Modulen (einem aktiv versorgten Modul 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 kann daher abgestuft in Achtel-Schritten relativ zur maximalen Spannung  $U_0$  dargestellt werden. Die Reihenfolge der Module mit ihren jeweiligen Spannungen ist dabei nicht auf die dargestellte Reihenfolge festgelegt. Beispielsweise könnte das Modul mit  $U_0/2$  das letzte in der Serie sein. Festgelegt ist nur das aktiv versorgte Modul, das die Spannung  $U_0$  bereitstellt. Vorzugsweise bildet dieses das erste Modul in der Serie, wobei dies jedoch nicht zwingend der Fall sein muss. Das Klemmenpaar 680, 681 stellt die Anschlüsse für das Gleichspannungssystem (z.B. Batterie) dar. Die Ausgangsklemmen 690, 691 bilden den AC-Kreis. Mit diesem System kann an den Ausgangsklemmen eine variable positive oder negative Spannung im Bereich von  $-U_0$  und  $U_0$  erzeugt werden. Typischerweise handelt es sich bei der Ausgangsspannung um eine Wechsellspannung mit gewünschter Frequenz und Amplitude (z.B. 230V/50Hz). Jedoch ist aufgrund der Möglichkeit, die Modul-Kondensatoren nachladen zu können auch eine Gleichspannung auf der Ausgangsseite erzeugbar. Das System kann verwendet werden, um Energie aus der Gleichstromquelle abzugeben und als Wechsellspannung über die Ausgangsklemmen in ein AC-Netz einzuspeisen. Jedoch ist auch der umgekehrte Betrieb möglich, in dem das AC-Netz die Gleichspannungsquelle lädt.

Figur 6c zeigt eine weitere Ausführungsform mit zusätzlichen Details. Sämtliche Module sind hier als Vierquadrantenmodule ausgeführt. Die Modulkette 620 stellt den Stromrichter mit Transistoren und den zugehörigen Body-Dioden dar. Weiterhin ist bei der Modulkette 620 noch die zugehörige Controllerschaltung 622 gezeigt. Diese Controllerschaltung dient dazu, die benötigten Schaltzustände der Module zu bestimmen und an die Module weiterzugeben. Beispielsweise werden die Spannungen der Energiespeicherelemente aller Module erfasst und der Strom, welcher durch die Modulkette fließt (dieser entspricht dem Ausgangsstrom des Stromrichters, der wegen der Bidirektionalität des Stromrichters positiv oder negativ sein kann). Entsprechend der einzelnen Spannungen der Energiespeicherelemente und einem Vergleich mit einer jeweiligen Sollspannung entscheidet die Controller-Schaltung für jedes einzelne Modul, ob es geladen oder entladen werden soll, sofern es nicht in den Bypass-Zustand geschaltet werden soll. Aus der Vorgabe einer gewünschten momentanen Sollspannung, welche wiederum aus einem gewünschten Spannungsverlauf abgeleitet wird und der Polarität des Ausgangsstromes kann die Controller-Schaltung dann die für den gewünschten Spannungsverlauf im momentanen Zeitpunkt benötigten Schaltzustände jedes Moduls berechnen. Entsprechend kann sie dann die erforderlichen Transistor-Steuersignale (oder allgemein Schalteinrichtungs-Steuersignale) an alle Module ausgeben.

Der modulare Aufbau des Stromrichters in Kombination mit der Controllerschaltung erlaubt ein sehr hohes Maß an Flexibilität des Stromrichters, da ein großer Teil der Betriebsstrategie des

Stromrichters in Form von austauschbarer Software in der Controllerschaltung hinterlegt bzw. abgespeichert werden kann. Auf diese Weise kann die Controllerschaltung einfach über eine entsprechende Umprogrammierung, bzw. Parameteranpassung an unterschiedliche Betriebsstrategien des Stromrichters angepasst werden. Beispielsweise kann hierbei die Spannungstoleranz bestimmt werden, entsprechend der die Controllerschaltung entscheidet, ob ein Energiespeicherelement eines Moduls nachgeladen oder entladen werden soll. Auch kann über ein solches Steuerprogramm variabel definiert werden, ob zusätzlich zu den Stufenfunktionen eine Pulsweitenmodulation in Höhe einer Spannungsstufe angewendet werden soll. Hierdurch kann ein glatterer Verlauf der mittleren ausgegebenen Spannung erreicht werden; andererseits steigen auf diese Weise die Schaltverluste. Der Stromrichter kann durch entsprechendes Umkonfigurieren auch an eine veränderte Spannung im Gleichstromkreis angepasst werden, in dem sämtliche Sollspannungswerte der Module entsprechend angepasst werden. Weiterhin kann die Controllerschaltung über ihre Software so angepasst werden, dass der Stromrichter weniger Spannungsstufen erzeugt als technisch möglich wäre. Durch eine solche Betriebsstrategie können beispielsweise die Schaltverluste der Halbleiter und die Kondensatorverluste bei großen Stromrichter-Leistungen reduziert werden, falls der Betrieb des Stromrichters es erlaubt mit einer geringeren Stufenzahl zu arbeiten. Eine entsprechende Programmierung und Rekonfiguration der Controllerschaltung kann auch optisch oder über Funk erfolgen, so dass hierfür keinerlei galvanische Verbindung zu dem Stromrichter oder seiner Steuerung erfolgen muss.

Ein Teil der Funktionalitäten, die für die Steuerung des Stromrichters erforderlich sind, kann auch auf einzelne eigene Steuereinheiten übertragen werden, die jeweils direkt mit den einzelnen Modulen verbunden sind. Diese Steuereinheiten können beispielsweise die Ladezustände der Energiespeicherelemente überprüfen, so dass nicht die Ladespannung sondern nur der Ladezustand an die Controllerschaltung gemeldet wird. Weiterhin können die Steuereinheiten Sicherheitsfunktionen übernehmen und nur bestimmte Schaltkombinationen der Schaltelemente zulassen, oder im Fehlerfall ein betreffendes Modul in den Bypass-Zustand versetzen. Eine Kommunikation zwischen diesen Steuereinheiten und der Controllerschaltung kann beispielsweise über einen potentialfreien bidirektionalen Datenkanal erfolgen. Auch hier kann die Übertragung von Daten per Funk oder optisch erfolgen.

Die Modulkette 630 in Figur 6d zeigt symbolisch die gleichen Module mit einer Länge, die ihrer jeweiligen Spannung im Sinne von Zweierpotenzen (falls so gewählt) entspricht.

Durch einen entsprechenden Laststrom (bzw. Strom aus einer Quelle) werden die Kondensatoren der Module je nach geschalteter Polarität entladen oder geladen, was zu einem entsprechenden Ansteigen oder Absinken der Kondensatorspannung führt. 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 Strompfad liegt. Auf diese Weise wird der entsprechende Kondensator durch den Laststrom wieder aufgeladen. Da sich durch diese Maßnahme aber die Gesamtspannung verändert, muss entsprechend der gewünschten Sollspannung dann eine andere Kombination von Modulen geschaltet werden, welche jedoch die gleiche Ausgangsspannung liefert. Details zu diesem Prinzip der Nachladung bei gleichbleibender Ausgangsspannung werden in Zusammenhang mit den Figuren 14 und 15 erläutert.

Das Funktionsprinzip lässt sich auch umkehren; dies bedeutet, dass eine elektrische Leistung an den Ausgangsklemmen zugeführt wird und über den Gleichspannungskreis abgegeben wird. Die über die Ausgangsklemmen zugeführte Spannung muss dabei mindestens der Spannung des Energiespeicherelementes mit der geringsten Spannung (geringste Zweierpotenz) entsprechen (d.h. typischerweise dem untersten Modul bei streng gestaffelter Anordnung).

Anstelle eines einzigen aktiv versorgten Moduls bzw. einer Spannungsquelle können auch mehrere solche aktiv versorgte Module in Serie geschaltet sein.

Figur 7 stellt beispielhaft mögliche unterschiedliche Schaltkombinationen der vier Module gemäß Figur 6b mit Hilfe von Spannungspfeilen dar. Die Pfeillänge ist bei dieser Darstellung proportional zur jeweiligen Spannung gewählt. Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Spannungen der momentan aktiv geschalteten Module; der graue Pfeil entspricht der resultierenden Ausgangsspannung des Systems, d.h. der Ausgangsspannung der Serienschaltung von Modulen. Pfeil 730 der Schaltkombination 710 stellt die Spannung  $U_0$  des aktiv versorgten Moduls dar. In der Figur 7 sind die Module 650, 660, 670 aus Figur 6b alle aktiv geschaltet, haben aber inverse Polarität. Entsprechend sind die Pfeile 732, 734 und 736 mit umgekehrter Richtung dargestellt.

Die Pfeilrichtungen lassen gleichzeitig einen Rückschluss auf die Stromflussrichtung zu. Wenn an den Ausgangsklemmen eine Last angeschlossen ist, entspricht eine Pfeilrichtung nach unten einer Stromabgabe und eine Pfeilrichtung nach oben einer Stromaufnahme. Im vorliegenden Fall wird das aktiv versorgte Modul 640 entladen, während die Module 650, 660, 670 geladen werden. Die resultierende Spannung, die am Klemmenpaar 690, 691 abgegriffen werden kann, wird durch den Pfeil 738 dargestellt. Entsprechend ist die Spannung an den Ausgangsklemmen positiv und hat den Wert  $U_0/8$ .

Bei der Schaltkombination 712 gemäß Figur 7 wird die gleiche Ausgangsspannung von  $U_0/8$  wie in der ersten Konfiguration erzeugt. Jedoch wird hier das aktiv versorgte Modul jetzt im Bypass betrieben, so dass es keine Spannung abgibt. Modul 650 wird jetzt entladen, während die Module 660 und 670 weiterhin geladen werden. Entsprechend existieren auch hier nicht gezeigte Schaltkombinationen, bei denen die Module 660 und 670 entladen werden können.

Dieser Aspekt wird im Zusammenhang mit Figur 17 im Detail erläutert. Die Schaltkombinationen 714, und 716, erzeugen jeweils Spannungen von  $U_0/4$ , die Schaltkombinationen 718, und 720, Spannungen von  $3/8 U_0$ . Durch die Schaltkombination 722, kann an den Ausgangsklemmen eine Spannung von  $U_0/2$  erzeugt werden. Bei Umkehrung aller Pfeilrichtungen können entsprechende negative Spannungen erzeugt werden.

Für eine Modulkette, bestehend aus einem aktiv versorgten Modul mit Spannung  $U_0$  und weiteren  $n-1$  Vierquadranten-Modulen (d.h. insgesamt gibt es  $n$  Module), mit nach Zweierpotenzen abgestuften Modulspannungen, lässt sich folgender Zusammenhang zeigen:

An den Ausgangsklemmen einer solchen Modulkette kann jede beliebige Spannung von  $-U_0$  bis  $U_0$  in Stufen von  $U_0/(2^{(n-1)})$  dargestellt werden und zwar unabhängig vom aktuellen Ladezustand der einzelnen Energiespeicherelemente (beispielsweise Kondensatoren) der Module. Ladezustand bedeutet hierbei, 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 Ausgangsspannung unter Last - entsprechend den Ladezuständen der Modul-Kondensatoren - ständig zwischen bestimmten Modulkonfigurationen hin und hergeschaltet werden. Diese bestimmten Modulkonfigurationen liefern dabei zusammen eine gleichbleibende Ausgangsspannung, lassen aber ein erforderliches Nachladen bzw. Entladen bestimmter Modul-Kondensatoren zu, ohne dass dies am Ausgang zu einer spürbaren Veränderung der Ausgangsspannung führt. Daher existieren für jede darstellbare Ausgangsspannung – außer für 0V (alle Module im Bypass-Zustand), der maximalen Spannung  $U_0$  (nur das aktiv versorgte Modul liefert Spannung) und der minimalen Spannung  $-U_0$  (hier liefert das aktiv versorgte Modul seine invertierte Spannung) – immer mindestens zwei Modulkonfigurationen zur Darstellung dieser Ausgangsspannung. Weitere Details zu diesem Prinzip werden im Zusammenhang mit den Figuren 14 und 15 erläutert.

Obwohl eine Abstufung der Modulspannungen nach Zweierpotenzen bevorzugt ist und maximale Flexibilität und leichte Ansteuerbarkeit ermöglicht, sind auch andere Abstufungen denkbar, beispielsweise entsprechend Dreierpotenzen. Dies kann jedoch dazu führen, dass anders als im Fall von Zweierpotenzen, bestimmte Modulspannungen zwei- oder mehrfach vorhanden sein müssen.

Weiterhin, können für den Fall dass mehrere Gleichspannungskreise zur Verfügung stehen, auch Konfigurationen verwendet werden, bei denen mehrere aktiv versorgte Module verwendet werden, die jeweils mit einem Gleichspannungskreis verbunden sind.

Die Frequenz, mit der Modulkonfigurationen umgeschaltet werden müssen, wird einerseits durch die erlaubte Toleranz der Modulkondensator-Spannungen und deren Einfluss auf die Ausgangsspannung, den Laststrom und die Kapazität der Kondensatoren bestimmt. Insbesondere können durch Verwendung großer Kapazitäten für die Modulkondensatoren sehr geringe Schaltfrequenzen erreicht werden, da die Spannungsänderungen langsamer von statten gehen. Bei Ausgabe von Wechselspannung bestimmt jedoch die Frequenz dieser Wechselspannung die minimal zulässige Schaltfrequenz (d.h. der Schaltzeitpunkt muss auf Grund der darzustellenden Frequenz und somit des Anstiegs der Stufenfunktion deutlich früher liegen, als dies elektrisch eigentlich durch den Modulkondensator erforderlich wäre). Umgekehrt kann die Kapazität der Kondensatoren und damit das benötigte Kondensatorvolumen - welches neben den Filterkosten einen wichtigen Kostenfaktor bei Stromrichtern darstellt - stark verkleinert werden, in dem der obige Vorgang gezielt mit relativ hoher Schaltfrequenz durchgeführt wird.

Weiterhin und insbesondere im Zusammenhang mit dem oben gesagten kann mittels der Module zusätzlich eine Pulsweitenmodulation über die erzeugte Stufenfunktion gelegt werden. Dies bietet sich insbesondere dort an, wo auf Grund einer geringen Modulanzahl eine relative grobe Stufung erfolgt. Mittels der darübergerlegten Pulsweitenmodulation kann im Mittelwert eine weitere Optimierung erfolgen. In Zusammenhang mit Figur 8b werden weitere Details zu dieser Variante erläutert.

Hohe Schaltfrequenzen haben weiterhin den Vorteil, dass eine zwischen die Modulkette und die Last verschaltete Filterschaltung zur Glättung von Ausgangsstrom und -spannung nur wenig Energie (entsprechend der abzufangenden Spannung und der Periodendauer zwischen den Schaltzuständen) speichern muss und damit kleiner dimensioniert werden kann. Eine Erhöhung der Schaltfrequenz erhöht allerdings die Schaltverluste der Transistoren.

Obige Betrachtungen zur Erzeugung variabler, in Stufen einstellbarer Ausgangsspannungen lassen sich sinngemäß auch umkehren, so dass die Schaltung einen Leistungsfluss von den rechten zu den linken Klemmen gestattet. Dabei muss die an den rechten Klemmen anliegende Spannung lediglich etwas größer also die Spannung des Moduls mit der kleinsten Spannung  $U_0/2^{n-1}$  sein. In diesem Fall kann dann äquivalent zunächst jedes passive Modul nachgeladen werden und seine Energie in das aktiv versorgte Modul (welches mit der festen Gleichspannung verbunden ist) übertragen und somit über die linken Klemmen in das Gleichspannungssystem einspeisen. In diesem Fall gilt, dass ein Modul, dessen Kondensatorspannung durch die Energieeinspeisung eine Toleranzschwelle überschreitet –

bei entsprechender Änderung der gesamten Modulkonfiguration, gemäß der anliegenden Spannung – dann umgekehrt in den Strompfad geschaltet und somit wieder entladen wird.

Bei dem in Figur 6 dargestellten einphasigen System haben die Ausgangsklemmen systembedingt ein fluktuierendes Potential relativ zu den Eingangsklemmen. Daher darf hier beispielsweise nicht der Minuspol der linken Seite mit einer der beiden Ausgangsklemmen der rechten Seite verbunden werden. Lösungen zu dieser Problematik werden im Folgenden im Zusammenhang mit mehrphasigen Systemen und den Figuren 9 bis 13 erläutert.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Hauptmodul mit einer Gleichspannung  $U_0$  gespeist und im Falle von einphasigen Systemen führt dies zu Ausgangsspannungen im Bereich zwischen  $+U_0$  und  $-U_0$ . Für den Fachmann ist jedoch klar, dass unter bestimmten Voraussetzungen zumindest kurzzeitig auch Ausgangsspannungen dargestellt werden können, die im Bereich von fast  $+2U_0$  und  $-2U_0$  liegen. Insbesondere werden diese Maximalspannungen dadurch erreicht, indem alle Module in den aktiven Betrieb geschaltet werden ( $U_0 + \frac{1}{2} U_0 + \frac{1}{4} U_0 + \frac{1}{8} U_0$  etc.) oder alle in den invertierten Betrieb ( $-U_0 - \frac{1}{2} U_0 - \frac{1}{4} U_0 - \frac{1}{8} U_0$  etc.).

#### Regeln für das Einstellen von Spannungsstufen:

Folgende Ausführungen erläutern weitere bevorzugte Details und können sinngemäß bei den obigen Grundlagen und einphasigen Systemen zur Anwendung kommen, als auch bei denen im Folgenden beschriebenen weiteren Systemen.

An den Ausgangsklemmen eines ein- oder mehrphasigen Stromrichters kann entsprechend einem Aspekt der vorliegenden Erfindung eine gestufte Spannung erzeugt werden, indem jeweilige Schaltzustände für die entsprechenden Module des Stromrichters gemäß den folgenden Regeln eingestellt werden.

Das System besteht aus

- einem aktiv versorgten Modul mit einer beliebig zuschaltbaren Spannung und
- zusätzlichen Vierquadranten-Modulen, die je nach Ladezustand entweder mit positiver oder mit negativer Spannung betrieben werden können oder alternativ in den Bypass-Modus geschaltet werden.

Mit der Kombination dieser Module sollen Gesamtspannungswerte bis zur größten Modulspannung (d.h. zur größten Spannung die das aktiv versorgte Modul liefern kann) abgebildet werden, die dem Vielfachen der kleinsten Modulspannung (d.h. der Spannung des Energiespeichers eines Vierquadranten-Moduls mit der kleinsten Klemmenspannung) entsprechen.

Jede positive Ausgangsspannung, die aus einer Kombination von ausschließlich positiven Modulspannungen erzeugt wird (sogenannte Grundzustände), ist weiterhin darstellbar, wenn für beliebige Vierquadranten-Module lediglich die Möglichkeit vorliegt, neben dem Bypass-Modus mit negativem Spannungswert betrieben zu werden (diese Aussage gilt nicht für die Maximalspannung  $U_0$ , die nur durch das aktiv versorgte Modul geliefert werden kann und für die Spannung 0, bei der alle Module im Bypass-Zustand betrieben werden). Die damit gewonnene mehrfache Darstellbarkeit einer Ausgangsspannung ermöglicht eine Abfolge von Schaltzuständen, bei der entladene Module in einem der nachfolgenden Schaltzustände geladen und geladene Module entladen werden können. Dieses Prinzip kann auch dafür genutzt werden, innerhalb einer Spannungsstufe den Schaltzustand zu wechseln. Entsprechendes gilt auch für negative Ausgangsspannungen.

Die obigen Betrachtungen beziehen sich auf den Fall einer Energieabgabe an eine Last. Im Falle einer Energieaufnahme von einer Quelle (z.B. Bremsvorgang in einem Elektrofahrzeug) werden negativ gesetzte Module entladen und positiv gesetzte Module geladen. Dies muss bei der Schaltung der Module entsprechend berücksichtigt werden, um den tatsächlich gewünschten Ladezustand herbeizuführen.

Die erwähnte Flexibilität beruht auf der grundsätzlichen Möglichkeit, einen gewünschten positiven Spannungswert eines bestimmten Moduls (außer dem aktiv versorgten Modul), welcher derzeit auf Grund des Ladezustands des betreffenden Moduls aber nicht zur Verfügung steht, durch Kombination der positiven Spannung des Moduls mit der nächsthöheren Spannung in Kombination mit der negativen Spannung (auf Grund des Ladezustands) des betreffenden Moduls zu bilden. Beispiel: wenn in einer Kette von Modulen mit den Spannungen 1V, 2V, 4V, 8V ... eine Spannung von 4V gewünscht wird, aber dieses Modul derzeit geladen werden soll und somit -4V liefert, kann eine Spannung von 4V erreicht werden, wenn ein Modul mit 8V zusammen mit den -4V des betreffenden Moduls kombiniert wird. Dieses Prinzip gilt rekursiv, d.h. wenn dieses nächsthöhere Modul (z.B. 8V) ebenfalls nur negativ zur Verfügung steht (d.h. -8V), kann wieder mit dem nächst höheren Modul (hier 16V) ausgeglichen werden:  $16V - 8V - 4V = 4V$ . Da das höchste Modul aktiv versorgt wird, steht spätestens dieses Modul stets zum Ausgleich zur Verfügung. Diese Betrachtungen gelten sinngemäß auch für alle negativen Spannungen. Beispiel:  $-4V = -16V + 8V + 4V$ .

Für einen spezifischen Zustand, in dem die Vier-Quadranten-Module beliebig mit positiver oder negativer Spannung zur Verfügung stehen, kann folgende Methode zur Festlegung des Schaltzustandes der einzelnen Module und damit für den Ausgleichsvorgang festgelegt werden beliebig Ausgedrückt als Regel können somit folgende Fälle für diese Ausgleichsvorgänge unterschieden werden (Abstufung der Spannungen der Energiespeicher in Zweierpotenzen beispielhaft angenommen):

- Die Vierquadranten-Module werden, mit dem niedrigsten Spannungswert beginnend, entsprechend dem Grundzustand im Bypass-Modus oder mit positivem Spannungswert verschaltet.
- Sollte ein Vierquadranten-Modul im Grundzustand mit positivem Spannungswert benötigt werden, aber aufgrund des Ladezustands lediglich mit negativem Spannungswert verschaltbar sein, so wird es mit negativem Spannungswert verschaltet. Die nächstfolgenden Vierquadranten-Module werden dann gemäß folgender Regel zugeschaltet:
  - Falls das Vierquadranten-Modul mit der nächsthöheren Spannung für einen Grundzustand nicht benötigt wird, wird es grundsätzlich zugeschaltet.
    - Bei positivem Spannungszustand ist der Spannungsausgleich damit beendet.
    - Bei negativem Spannungszustand (invertiert zur Ladung) wird die Höhe der auszugleichenden Spannung damit verdoppelt und muss dann mit dem Modul mit der nächsthöheren Spannung ausgeglichen werden.
  - Falls die Spannung des Vierquadranten-Moduls mit der nächst höheren Spannung für den Grundzustand benötigt wurde, wird es in diesem Fall grundsätzlich im Bypass-Modus betrieben. Die Anforderung an die auszugleichende Spannung wird damit erneut verdoppelt.

Da die Anforderung an die auszugleichende Spannung mittels des nächstfolgenden Vierquadranten-Moduls entweder ausgeglichen oder verdoppelt wird, ist in jedem Fall spätestens ein abschließender Ausgleich durch das aktiv versorgte Modul möglich.

Die gleiche Logik gilt mit umgekehrtem Vorzeichen für die Erzeugung von negativen Gesamtspannungen.

Beispiel: Wenn in der vorher erwähnten Kette von Modulen mit den Spannungen 1V, 2V, 4V, 8V ... eine Ausgangsspannung von 6V gewünscht ist, so wäre der Grundzustand  $2V + 4V = 6V$ ; d.h. nur die beiden Module für 2V und für 4V müssten positiv geschaltet werden, alle anderen Module sind im Bypass zu schalten. Falls – abweichend vom Grundzustand – das 2V-Modul positiv nicht zur Verfügung steht, wird es trotzdem benötigt (gemäß obigen Regeln); daher wird es invertiert zugeschaltet. Weiterhin wird das nächst höhere, das 4V-Modul in den Bypass-Zustand geschaltet (da es nach den obigen Regeln für den Grundzustand gebraucht wurde). Das bzgl. der Spannung darauf folgende Modul, das 8V-Modul wird wieder zugeschaltet (da es gemäß den obigen Regeln für den Grundzustand nicht benötigt wird). In diesem Fall würde sich also:  $-2V + 8V = 6V$  ergeben. Falls allerdings das 8V-Modul ebenfalls nicht positiv zur Verfügung steht, wird es trotzdem verwendet – allerdings invertiert – und das

nächst höhere Module aktiviert:  $-2V -8V +16V = 6V$ . Dies kann bei Bedarf fortgesetzt werden bis zum aktiv versorgten Modul, welches immer zur Verfügung steht.

Anzahl der einstellbaren Spannungsstufen:

Im Folgenden wird - ausgehend von einer Abstufung der Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente in Zweierpotenzen - die Anzahl der möglichen einstellbaren Spannungsstufen betrachtet. Als höchste Spannungsstufe wird nicht die Summen-Spannung aller  $n$  Module gerechnet, sondern nur die Stufe des aktiv versorgten Moduls. In binärer Schreibweise ausgedrückt, bei der eine 1 ein positiv zugeschaltetes Modul und eine 0 ein Modul im Bypass-Betrieb beschreibt, wäre das bei angenommenen 5 Modulen der Vektor 10000. Die höchste theoretisch mögliche Spannung wäre in diesem Fall 11111, also alle  $n$  Module in gleicher Spannungsrichtung im Einsatz – dieser Fall ist allerdings meist nicht sinnvoll, da die Module in einem Betrieb als Stromrichter nicht mehr beliebig nachladbar sind. Mit dieser vektoriellen Darstellung (z.B. Zustand 1; 0; -1) lässt sich das für eine bestimmte Ausgangsspannung erforderliche Schaltverhalten aller Module gut beschreiben. Die Schaltung der Module entspricht somit der Veränderung des Vektors auf den im Takt nachfolgenden Vektor. Die Taktung und damit Umschaltung zur nächsten Modulkonfiguration erfolgt vorzugsweise regelmässig und mit einer Frequenz die deutlich über der Frequenz des darzustellenden Ausgangssignals liegt. Abhängig von der darzustellenden Ausgangsfunktion und der Speicherkapazität der Transistoren kann sie auch darunter liegen.

Damit ergibt sich die Anzahl  $S_+$  der positiven Stufen zu:

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

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:

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

Figur 8 zeigt den gestuften Verlauf einer Sinusspannung, wie er bei Ausgabe über einen Stromrichter gemäß Ausführungsform bestehend aus 5 Modulen ausgegeben werden kann. Insgesamt kann die Ausgangsspannung in 33 Spannungsstufen ausgegeben werden. Die Ausgangsspannung kann anschließend optional durch Filterschaltungen oder weiterhin optional durch zusätzliche pulswidenmodulierte Ansteuerung der Module noch weiter geglättet werden, vergleiche die Ausführungen oben.

Mehrphasige Systeme:

Für die im folgenden beschriebenen mehrphasigen Systeme gelten sämtliche obigen Ausführungen, insbesondere zu Grundlagen und einphasigen Systemen, entsprechend.

Bei einem mehrphasigen System kommt der Umstand zum tragen, dass das mit Strom aktiv versorgte Modul des einphasigen Systems ständig umgepolt wird und die Ausgangsklemmen gegenüber den Gleichspannungsanschlüssen des Eingangs somit keinen definierten Massepunkt aufweisen.

Bei Verwendung von mehrphasigen Verbrauchern oder Quellen, bei denen die einzelnen Phasen isoliert gegeneinander betrieben werden können, die also auch nicht als Stern verschaltet sind (z.B. Transformatoren oder Motoren/Generatoren mit isolierten, nicht-verbundenen Wicklungen) können mehrphasige Stromrichtersysteme aufgebaut werden, in dem mehrere solche einphasigen Stromrichter nach Figur 6 über den Gleichspannungskreis verbunden werden. Ein solches System ist in Figur 9 zur Ansteuerung eines dreiphasigen Motors 910 dargestellt. Die einzelnen drei Wicklungen 920, 930 und 940 des Motors werden von den drei einphasigen Stromrichtern 950, 960 und 970 so gespeist, dass in den drei Wicklungen ein Drehfeld entsteht. Vorteilhaft ist hierbei, dass für jede Phase zur Erzeugung der Ausgangsspannung das Potential der Gleichspannung einfach umgepolt werden kann. Entsprechend ergibt sich bei einer Spannung von  $U_0$  im Gleichspannungskreis für jede Phase eine mögliche Ausgangsspannung zwischen  $+U_0$  und  $-U_0$  (im Gegensatz dazu würde die Spannung an den Klemmen eines herkömmlichen Stromrichters gemäß Figur 1 nur einen Bereich von  $+U_0/2$  und  $-U_0/2$  abdecken). Die zur Steuerung der Schalteinrichtungen und zur Erfassung der Ladezustände, des Laststroms, des Drehfeldes etc. erforderliche Controller-Einrichtung ist in dieser Darstellung zur Vereinfachung nicht eingezeichnet.

Wenn sich die Ausgangsklemmen auf ein gemeinsames Potential beziehen sollen bzw. ein gemeinsamer Bezugspunkt zwischen Ein- und Ausgang erforderlich ist, werden gemäß weiteren Aspekten der Erfindung geänderte Schaltungstopologien vorgeschlagen. Hinsichtlich der passiven Vierquadranten-Module mit ihren Kondensatoren als Energiespeicherelemente ist das mehrphasige System gleichartig zu dem einphasigen System aufgebaut, vgl. oben. Da sich die Ausgangsklemmen aller Phasen auf ein gemeinsames Potential beziehen müssen, muss hier ein darauf angepasstes aktiv versorgtes Modul eingesetzt werden, welches im Folgenden beschrieben wird.

Bei den Figuren der im Folgenden beschriebenen Systeme wird die Spannung im Gleichstromkreis jeweils formal als  $2 \cdot U_0$  dargestellt, da sie für die entsprechenden Mehrphasensysteme Ausgangsspannungen erzeugen, die jeweils im Bereich von  $+U_0$  und  $-U_0$  liegen.

In einer ersten diesbezüglichen Ausführungsform ist die Gleichspannungsversorgung so ausgeführt, dass eine Mittelanzapfung zur Verfügung gestellt wird. Diese Mittelanzapfung stellt sowohl eingangsseitig als auch ausgangsseitig "0V" dar und kann damit gleichzeitig als Sternpunkt des Ausgangssystems dienen.

Das aktiv versorgte Modul, im Folgenden als aktiv versorgtes Mehrphasenmodul bezeichnet, muss so konfiguriert sein, dass das Potential je nach abzugebender Spannung zwischen  $+U_0$  und  $-U_0$  hin- und herspringt.

Figur 10 zeigt eine erste Ausführungsform für die Schaltung eines derartigen Moduls 1010. Dabei wird das dargestellte aktiv versorgte Mehrphasenmodul (die weiteren Module können wie oben beschrieben ausgeführt sein) für jede Phase des aufzubauenden Mehrphasensystems benötigt. Das Prinzip lässt sich für beliebige Phasenzahlen realisieren. Das aktiv versorgte Mehrphasenmodul nach Figur 10 wird von einer Gleichspannungsversorgung mit den Spannungen  $\pm U_0$  über die Anschlüsse 1050 und 1070 und die Mittelanzapfung 1060 versorgt. Wenn dieses aktiv versorgte Mehrphasenmodul eine positive oder negative Spannung über seine erste Ausgangsklemme 1090 an das nachfolgende Vierquadranten-Modul weiterreichen soll, ist jeweils der zweite Anschluss 1080 mit „0V“ verbunden. Dieses Spannungspotential entspricht einerseits dem optionalen Sternpunkt des Ausgangs und andererseits der Mittelanzapfung der Gleichspannungsversorgung. Je nach gewünschtem Zustand ist jeweils einer der drei Schalter 1020, 1030 und 1040 zu schließen. Allerdings stellt dieses schematische Schaltbild zwei spezielle Anforderungen an die Schalter. Der oberste Schalter 1020 und der unterste Schalter 1040 müssen für eine Spannungsfestigkeit von  $2 \cdot U_0$  ausgelegt werden. Weiterhin muss der mittlere Schalter 1030 in beiden Spannungsrichtungen sperren können. Jeweils ein solches aktiv versorgtes Mehrphasenmodul wird für jede Phase des Stromrichters benötigt.

Eine zweite Ausführungsform mit ähnlichen Eigenschaften bildet die Schaltung 1110 nach Figur 11, wobei hier ein aktiv versorgtes Mehrphasenmodul gemäß der in Figur 11 dargestellten Schaltung pro Phase benötigt wird. Auch hier können Spannungen über die Gleichspannungsanschlüsse 1150, 1160, 1170 über entsprechende Schalter 1120, 1122, 1124, 1126, 1128, 1130 an die Ausgangsklemmen 1180, 1190 weitergereicht werden. Sie benötigt zwar insgesamt 6 Schalter pro Phase, allerdings müssen diese Schalter nur für jeweils die halbe Spannung des Gleichspannungskreises, also nur für  $U_0$  ausgelegt werden. Weiterhin müssen die verwendeten Schalter nur in einer Spannungsrichtung sperren können. Daher können hier beispielsweise IGBTs oder MOSFETs eingesetzt werden.

Figur 12 zeigt unterschiedliche Schaltzustände der Transistoren dieser zweiten Ausführungsform. Die über die Transistoren gelegten Balken sollen jeweils die momentan leitend geschalteten Transistoren darstellen. Entsprechend erzeugt die erste

Schaltkonfiguration 1210 an den Ausgangsklemmen eine positive Spannung, die Konfigurationen 1220 und 1240 erzeugen 0V und die Konfiguration 1230 eine negative Spannung. Die Schaltung nach Figur 12 kann daher auch als eine Phase eines Dreipunktstromrichters betrachtet werden, der die drei Spannungspegel  $+U_0$ , 0 und  $-U_0$  liefern kann.

Falls im mehrphasigen Ausgangskreis des Stromrichters kein Sternpunkt benötigt wird, kann eine dritte Ausführungsform der aktiv versorgten Mehrphasenmodule zum Einsatz kommen, wie sie in Figur 13 gezeigt ist. Diese Ausführungsform nutzt als aktiv versorgtes Mehrphasenmodul 1310, 1312, 1314 für jede Phase eine einfache Halbbrücke, bestehend aus zwei Schaltern 1316, 1318, welche nur zwischen positiver Spannung  $2 \cdot U_0$  und 0V umschalten kann. Figur 13 zeigt beispielhaft einen solchen Stromrichter mit drei Phasen und drei zusätzlichen Vierquadranten-Modulen pro Phase, allerdings kann das dargestellte Prinzip sowohl auf eine beliebige Anzahl von Phasen als auch eine beliebige Anzahl von eingesetzten Vierquadranten-Modulen pro Phase angewendet werden. Der positive Anschluss der Gleichspannungsversorgung wird mit dem oberen Eingangsanschluss 1320 verbunden, der negative Anschluss mit dem unteren Eingangsanschluss 1322. Ein so ausgestatteter einphasiger Stromrichter kann an jeder Ausgangsklemme des Stromrichters nur positive Spannungen zwischen 0V und  $2 \cdot U_0$  ausgeben. Entsprechend können die drei Ketten 1330, 1340 und 1350 des in Figur 13 gezeigten dreiphasigen Stromrichters auch nur jeweils positive Spannungen gegen den negativen Anschluss 1322 der Gleichspannungsversorgung erzeugen. Untereinander können die drei Ausgänge 1360, 1370 und 1380 jedoch so gesteuert werden, dass ein symmetrisches dreiphasiges Drehspannungssystem entsteht. Vorteilhaft bei dieser dritten Ausführungsform ist, dass pro Phase für das aktiv versorgte Mehrphasenmodul lediglich zwei Transistorschalter (oder allgemein Schalteinrichtung) benötigt werden, welche zudem nur in einer Stromrichtung sperren können müssen. Entsprechend bilden die oberen drei Module 1310, 1320, 1330 der Schaltung nach Figur 13 einen Zweipunktstromrichter. Wenn die Gleichstromquelle, die mit den Eingangsanschlüssen 1320, 1322 verbunden ist zusätzlich eine Mittelanzapfung aufweist, kann diese auch als Sternpunkt für das mehrphasige Ausgangssystem dienen. Damit liegt der wesentliche Unterschied zur Ausführungsform gemäß Figur 12 und Figur 13 darin, dass die Schaltung nach Figur 12 einen Dreipunktstromrichter bildet, während die Schaltung nach Figur 13 einen Zweipunktstromrichter bildet. Entsprechend ist für die Ausführungsform nach Figur 13 ein weiteres Vierquadranten-Modul nötig, um die gleiche Stufenzahl zu erreichen, wie bei der Ausführungsform nach Figur 12.

Allgemein ausgedrückt, kann gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung jeweils eine Kette von Vierquadranten-Modulen mit jeder AC-Klemme eines ein- oder mehrphasigen Zwei- oder Mehrpunktstromrichters so verbunden werden, dass diese jeweilige Kette zwischen der AC-

Klemme und der ein- oder mehrphasigen Last (bzw. Quelle) liegt. Damit fungiert diese Kette (bzw. diese Ketten) als eine Art Filterschaltung, welche die Anzahl ausgebarter Spannungsstufen des Stromrichters entsprechend vergrößert. Somit kann das Stromrichtersystem aufgetrennt werden in einen Zwei- oder Mehrpunktstromrichter und die zugehörigen Ketten aus Vierquadranten-Modulen. Eine solche Aufteilung kann beispielsweise vorteilhaft für Elektrofahrzeuge sein, da hier der zugehörige Stromrichter sowohl für die Ansteuerung des Motors (bzw. Generators für den Rekuperationsbetrieb) als auch für das Laden der Batterie (mit großer Leistung) verwendet werden kann. In einem solchen Fall kann der Stromrichter, welcher mit der Antriebsbatterie verbunden ist, über einen Umschalter einmal mit dem Motor und einmal mit dem ein- oder dreiphasigen AC-Netz verbunden werden. Für die Ansteuerung des Motors ist oft eine einfache Spannungsform des Ausgangs (z.B. Block-Kommutierung oder PWM-Ansteuerung) mit einem Zwei- oder Dreipunktstromrichter ausreichend, während das Laden der Batterie über ein ein- oder dreiphasiges AC-Netz höheren Anforderungen an die Wellenform des Spannungsverlaufs (wegen möglicher Netzurückwirkungen) genügen muss. In einem solchen Fall brauchen die Ketten von Vierquadranten-Modulen nur im Strompfad des ein- oder dreiphasigen AC-Netzes liegen und auch nur für die entsprechende Ladeleistung ausgelegt sein. Für den Betrieb des Motors kann dagegen auf die einfachere Wellenform des Zwei- oder Mehrpunktstromrichters zurückgegriffen werden, wodurch entsprechende Verluste der Transistoren der Modul-Ketten zusätzlich eingespart werden können.

Entsprechend können mit weiteren Stromrichterketten auch Netze mit mehr als drei Phasen generiert werden. Durch Kopplung von zwei derartiger ein oder mehrphasiger Stromrichtersysteme kann – nach Art eines Back-to-Back-Converters - auch ein Stromrichter aufgebaut werden, der an beiden Seiten variable Gleich- und Wechsel-Spannungen, mit bidirektionalem Leistungsfluss verarbeiten kann. Die Verbindung zweier solcher Stromrichtersysteme erfolgt – analog wie bei herkömmlichen Stromrichtersystemen – über den Gleichspannungskreis, der damit zum sog. Gleichspannungszwischenkreis wird. Auf diese Weise können beliebige Gleich- oder Wechselspannungen (mit beliebiger Phasenzahl und Frequenz) in beliebige andere Gleich- oder Wechselspannungen umgewandelt werden.

Grundsätzlich eignen sich alle vorgestellten mehrphasigen Stromrichtersysteme entsprechend erster, zweiter und dritter Ausführungsform für eine derartige Kopplung. Wenn das Potential des Gleichstromzwischenkreises keinen fest definierten Bezug zu den Wechselstromsystemen haben muss, stellt die dritte Ausführungsform nach Figur 13 die günstigste Möglichkeit dar.

#### Schaltverluste der Transistorschalter:

Schaltverluste entstehen in den verwendeten Halbleiterschaltern durch die endliche Schaltzeit, in der ein entsprechender Schalter weder isoliert noch gut leitet und dadurch hohe ohmsche

Verlustleistungen erzeugt. Damit sind diese Verluste in etwa proportional zur geschalteten Spannung, zum geschalteten Strom, zur Zeitdauer der Umschaltung und zur Schaltfrequenz. Die höchste zu schaltende Spannung liegt an dem von der Gleichspannung aktiv versorgten Modul an. Die Transistoren dieses Moduls müssen im Vergleich zu einem Zweipunktstromrichter allerdings nur die halbe Spannung schalten, nämlich die Spannung der Versorgungsschaltung. Weiterhin kann - im Gegensatz zu PWM-Stromrichtern - eine Reduktion der Schaltfrequenz durch Vergrößerung der Modul-Kondensatoren erreicht werden. Hierbei kann - bei Abgabe von Wechselstrom - die benötigte Schaltfrequenz der einzelnen Module etwa auf die Frequenz der ausgegebenen Wechselfspannung reduziert werden. Wenn - wie weiter unten erläutert - eine Schaltschwelle der Spannung für den Übergang Laden/Entladen definiert wird, ist die so entstehende Schaltfrequenz umgekehrt proportional zum Laststrom. Damit sinken sowohl die Schalt- als auch die Durchlassverluste überproportional mit abnehmendem Laststrom. Dies wiederum führt zu einem extrem hohen Teillast-Wirkungsgrad.

Alle Schaltelemente können beispielsweise als Transistoren (beispielsweise MOSFET oder auch IGBT) oder andere Halbleiterschalter ausgeführt und durch Parallelisierung in der Stromtragfähigkeit verbessert werden.

*Einfache Beispiele zur detaillierten Erläuterung des Prinzips der Lade- und Entladevorgänge:*

Nachfolgende Ausführungen sind nur beispielhaft und dienen dem besseren Verständnis. Für den Fachmann ist klar, dass sich diese Ausführungen auch auf eine beliebige Anzahl  $n$  von Modulen, eine beliebige Art von Speicherelementen, Schalteinrichtungen, beliebige und insbesondere deutlich höhere Eingangsspannungen und beliebige dazustellenden Ausgangsspannungen beziehen.

Die folgenden beispielhaften Ausführungen an Hand der Figuren 14 und 15 sowie 8b stellen einerseits spezielle Details dar, erläutern andererseits Grundprinzipien der Erfindung, die ebenso für alle anderen Figuren und Ausführungsformen gelten.

*Beispiel 1, Erzeugung einer Gleichspannung mit 2 Modulen:*

Der in Figur 14 dargestellte Stromrichter soll zunächst nur aus zwei Modulen bestehen, einem aktiv versorgten Modul 1410 (hier als Vierquadranten-Modul ausgeführt) mit 12V (welches über die Klemmen 1430, 1440 aus dem DC-Kreis versorgt wird) und einem Kondensatorbasierten Modul 1420, welches für eine Spannung von 6V ausgelegt ist. Weiterhin soll der Stromrichter zunächst an seinen Ausgangsklemmen 1450, 1460 eine DC-Spannung von 6 V (d.h. die Spannung der „kleinsten Stufe“) abgeben, wobei auch ein gewisser Laststrom fließen soll. Die Startkonfiguration des Stromrichters sei dabei so gewählt, dass das 6V-Modul mit 6V vorgeladen ist. Das 12V-Modul kann auf Grund seiner Spannungsversorgung stets 12V liefern.

*Zeitspanne 0 bis  $t_1$ , 1470:*

Zunächst wird daher das 12V-Modul auf 0 (Bypass) geschaltet (in dem nur die beiden rechten oder die beiden linken Transistoren dieses Moduls gemäß der Abbildung eingeschaltet werden).

Das 6V-Modul gibt die geforderten 6V ab, wobei sich allerdings der Modulkondensator mit der Zeit entlädt, bis eine untere Toleranzschwelle erreicht ist. Beispielsweise bei Unterschreiten einer Spannung von 5,9 V muss das System dann umschalten.

*Zeitspanne  $t_1$  bis  $t_2$ , 1472:*

Nun wird das 12V-Modul aktiv auf +12V geschaltet, während das 6V-Modul mit seiner reduzierten Spannung von 5,9V negativ in Serie geschaltet wird, beispielsweise indem der rechte obere Schalter und der linke untere Schalter dieses Moduls durchgeschaltet werden. Damit ergibt sich nun eine neue Gesamtspannung von  $12V - 5,9V = 6,1V$ , die sich – diesmal durch das Aufladen des Kondensators (welcher durch den Ladungsabtransport vom negativen Pol des Kondensators bewirkt wird) – wieder langsam bis zur Toleranzschwelle absenkt. Da die gesamte im Kreis wirksame Kondensator-Kapazität gegenüber der ersten Zeitspanne nicht verändert ist (da elektrisch weiterhin nur ein Kondensator wirkt; er zugeschaltete weitere Kondensator der ersten Stufe ist elektrisch neutral, da auf Grund der Gleichspannungsversorgung stets auf voller Spannung gehalten wird), bleibt auch die Geschwindigkeit des Spannungsfalls gleich (die Zeitspanne verdoppelt sich allerdings gegenüber dem Start, da sich die Ausgangsspannung um 0,2 V von 6,1V auf 5,9V verändert). Dabei wird – durch den invertierten Betrieb – das 6V-Modul auf eine Spannung von 6,1V geladen.

*Zeitspanne  $t_2$  bis  $t_3$ , 1474:*

Hier ist nun wieder nur das 6V-Modul positiv aktiv (das 12V-Modul ist wieder im Bypass-Zustand), nur startet es mit 6,1V, so dass die dritte Zeitspanne so groß ist, wie die zweite.

Mit anderen Worten wird die Speichereinrichtung eines aktiven Moduls aufgrund des Laststroms entladen. Im invertierten Betrieb, führt der Laststrom jedoch zu einer Ladung des betreffenden Moduls, sodass sich der resultierende Spannungsbereich dieses Moduls auf diese Weise in vorbestimmten Grenzen halten lässt. Wenn der Ladezustand an einer Speichereinrichtung eines Moduls unter einen Grenzwert  $W_1$  zu fallen droht, wird dieses Modul in einer anschließenden Phase in den invertierten Betrieb geschaltet, wodurch sich die Speichereinrichtung wieder auflädt. Diese Aufladung erfolgt dann bis zum Grenzwert  $W_2$ , wobei zu diesem Zeitpunkt das Modul dann entweder wieder in einen Entladungsbetrieb, d.h. aktiven Betrieb geschaltet werden muss oder in den Bypass-Betrieb, um ein Überladen zu verhindern. Auf diese Weise kann jede Speichereinrichtung jedes Moduls in einem

vorgegebenen Spannungsbereich gehalten werden. Dieser kann elektrisch gesehen unabhängig von der tatsächlichen Speicherkapazität des Moduls sein. Die Verwendung kleinerer Kapazitäten wird somit häufigere Schaltvorgänge erfordern, als bei der Verwendung größerer Kapazitäten, da eine Nachladung zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen muss. Die Kapazitäten der einzelnen Module können gleich ausgelegt sein, obwohl die Module unterschiedliche Spannungsbeiträge liefern sollen. Sie können jedoch auch auf die ihnen zugewiesene Spannungsstufe abgestimmt sein. Dies alles ist jedoch bei der Steuerung der Betriebsartumschaltungen zu berücksichtigen.

#### Beispiel 2, Erzeugung einer Gleichspannung mit 3 Modulen:

Der in Figur 15 dargestellte Stromrichter soll zunächst aus drei Modulen bestehen, einem aktiv versorgten Modul 1510 mit 12V (welches über die Klemmen 1540, 1550 aus dem DC-Kreis versorgt wird) und zwei Kondensator-basierten Modulen 1520, 1530, einem Modul für 6V und einem Modul für 3V. Der Stromrichter soll jetzt an seinen Ausgangsklemmen 1560, 1570 eine DC-Spannung von 3 V abgeben, wobei wieder ein Laststrom fließt. Die Startkonfiguration des Stromrichters sei dabei entsprechend wieder so gewählt, dass das 6V-Modul mit 6V und das 3V Modul mit 3V vorgeladen ist.

#### *Zeitspanne 0 bis $t_1$ , 1580:*

Zunächst werden das 12V-Modul und das 6V-Modul auf 0 bzw. Bypass geschaltet. Das 3V-Modul gibt die geforderten 3V ab, wobei sich der Modulkondensator mit der Zeit entlädt, bis eine untere Toleranzschwelle von beispielsweise 2,9V erreicht ist.

#### *Zeitspanne $t_1$ bis $t_2$ , 1582:*

Das 6V-Modul wird nun aktiviert und das 3V-Modul hierzu umgekehrt in Serie geschaltet. Die Startspannung ist hier jetzt  $6V - 2,9V = 3,1V$ . Dieser Vorgang läuft, bis die Gesamtspannung wieder auf 2,9V abgefallen ist. Zu diesem Zeitpunkt ist (bei angenommen gleicher Kapazität der Modulkondensatoren) die Spannung des 3V-Moduls wieder auf 3,0V angestiegen; die Spannung des 6V-Moduls liegt jetzt bei 5,9V. 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.

Mit anderen Worten wirkt in dieser Phase die Kapazität von zwei Modul-Kondensatoren gegenüber der vorangegangenen Phase in der nur ein Modul-Kondensator gewirkt hat. Dies führt zu einem verdoppelten Spannungsgradienten. Die gesamte Ladephase ist jedoch gleich lang, wie bei der ersten Phase, da der doppelte Spannungshub auszugleichen ist. Diese Betrachtungen setzen die Verwendung gleicher Kondensator-Kapazitäten voraus, was auf

Grund der vereinfachten Schaltvorgänge eine bevorzugte Ausführungsform ist. Selbstverständlich könnten die Kapazitäten auf die beispielsweise nach Zweierpotenzen abgestuften Modulspannungen abgestimmt sein.

*Zeitspanne  $t_2$  bis  $t_3$ , 1584:*

Da nun der 3V-Kondensator wieder auf 3V geladen ist, kann wieder ein Zyklus wie in der ersten Spanne verwendet werden. Am Ende dieser Spanne ist der 3V-Modul-Kondensator entsprechend auf 2,9V entladen.

*Zeitspanne  $t_3$  bis  $t_4$ , 1586:*

Jetzt ist sowohl der Kondensator des 3V-Moduls als auch der des 6V-Moduls entladen. Daher werden in dieser Zeitspanne diese beiden Modulkondensatoren antiseriell, d.h. invertiert mit dem 12V-Modul geschaltet. Auf diese Weise ergibt sich eine Startspannung von  $12V - 5,9V - 2,9V = 3,2V$ . Die Spannung sinkt wegen der beiden seriell liegenden Kondensatoren wieder so schnell wie in der zweiten Phase (der ebenfalls in Serie liegende Kondensator des aktiv versorgten Moduls ist auf Grund der Gleichspannungsversorgung elektrisch neutral, siehe Ausführungen zu obigem ersten Beispiel); allerdings ist der Spannungshub etwas größer, da die Spannung nun von 3,2V auf 2,9V sinkt. Dies führt zu einer verlängerten Schaltphase. Dies muss die hier nicht gezeigte Controller-Einrichtung, welche die Ladungszustände der Kondensatoren überwacht, beim Schalten der Schalteinrichtungen der Module berücksichtigen. Am Ende beträgt die Kondensatorspannung des 6V-Moduls gemäß dem Beispiel 6,05V und die des 3V-Moduls 3,05V.

*Zeitspanne  $t_4$  bis  $t_5$ , 1588:*

Nun kann wieder das 3V-Modul alleine aktiviert werden; die Spannung sinkt von 3,05V auf 2,9V.

Entsprechend diesen Beispielen können die in Figur 8a dargestellten Stufen als eine kurzzeitig auszugebende Gleichspannung 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. Dies ist in Figur 16 genauer erläutert.

Weiterhin kann aber auch alternativ zusätzlich zur Vergleichmäßigung des Spannungsverlaufs noch eine Pulsweitenmodulation mit dem Spannungshub einer Spannungsstufe über den Stromrichter angesteuert werden, wie in Figur 8b dargestellt.

Für jede Schaltperiode ist in den Figuren 14 und 15 jeweils oben der Zustandsvektor angegeben, der angibt, welches Modul in dieser Modulkonfiguration jeweils gerade im aktiven Betrieb („1“), invertiertem Betrieb („-1“) und Standby („0“) sein muss. Letztlich kann das Schaltverhalten über die Aufeinanderfolge dieser Zustandsvektoren ausgedrückt werden und

die Controller-Einrichtung muss dieses Schaltverhalten leisten können. Beispielsweise kann ein Sinus am Ausgang durch die Abfolge geeigneter Zustands- bzw. Schaltvektoren beschrieben werden. Wenn zusätzlich, wie in Figur 8b gezeigt, eine Pulsweitenmodulation angewendet wird, so muss die Controllereinrichtung auch diese durch entsprechend getaktetes Ein- und Ausschalten leisten können.

Figur 16 verdeutlicht, dass insbesondere für eine langsam ansteigende Ausgangsspannung es erforderlich sein kann, die gleiche Ausgangsspannung über mindestens zwei aufeinanderfolgende Schaltperioden zu halten. Die rechte Seite zeigt vergrößert den eingekreisten Kurvenabschnitt der linken Seite. Während dieses Abschnittes wird über die Zeit 8-mal geschaltet und somit die Modulkonfiguration verändert. Für drei Perioden verändert sich die Ausgangsspannungsstufe nicht, anschließend verändert sie sich auf höherem Niveau für 5 Schaltperioden nicht. Während die Ausgangsspannung auf diese Weise kurzzeitig im Wesentlichen konstant gehalten wird, verändern sich jedoch trotzdem die Modulkonfigurationen, um dadurch ein Nachladen zu stark entladener Schalteinrichtungen zu ermöglichen, wie dies oben bereits ausführlich erläutert wurde.

Die im Zusammenhang mit der Figur 15 erläuterten Zustandsvektoren, die das Schaltverhalten der Module bestimmen und zu unterschiedlichen Modulkonfigurationen führen, die die gleiche Ausgangsspannung liefern können und somit das Nachladen einzelner Module ermöglicht, wird im folgenden im Zusammenhang mit Figur 17 nochmals in systematischerer Weise erläutert.

Beispiel zur Erzeugung einer Stufenfunktion bei beliebigen Anfangszuständen:

Figur 17 zeigt beispielhaft für den Fall einer Last die notwendigen Schaltzustände eines versorgten Hauptmoduls (HM) in Kombination mit drei Vierquadranten-Modulen (M2, M3, M4), um schrittweise mit der Stufenhöhe des kleinsten Vierquadranten-Moduls eine positive Ausgangsspannung  $U_A$  von 0 V bis zur Hauptgrundmodulspannung von 8V und zurück auf 0V abzubilden. Beispielsweise könnte so eine positive Sinushalbwelle erzeugt werden, wie dies symbolisch mit 1790 dargestellt ist. Die Hauptmodulspannung beträgt dabei 8V und die Sollspannungen  $U_{Soll}$  der Energiespeicherelemente der weiteren Vierquadranten-Module (M1-M4) betragen entsprechend 4V, 2V und 1V. Figur 17 stellt Abfolgen 1710 – 1780 der Schaltzustände  $S_1$  bis  $S_{17}$  für alle möglichen Kombinationen der anfänglichen Ladezustände  $LZ_{Soll}$  und damit für alle möglichen Kombinationen der möglichen Anfangsbetriebsspannungen  $U_{Betrieb}$  der Vierquadranten-Module dar.

Unter dem Begriff Ladezustand ist hierbei wieder gemeint, dass das betreffende Energiespeicherelement des jeweiligen Moduls entweder so geladen ist, dass es bei der nächsten Verwendung entladen werden darf, oder dass die Spannung dieses Energiespeicherelementes leicht unter dem Sollwert liegt und es daher in einem der folgenden

Zyklen aufgeladen werden soll. Entsprechend existieren für jedes Modul zwei mögliche Ladezustände:  $LZ_{\text{Soll}}=J$  („Ja“) bedeutet, das Energiespeicherelement darf entladen werden; für  $LZ_{\text{Soll}}=N$  („Nein“) muss das Energiespeicherelement in einem der folgenden Zyklen aufgeladen werden.

Für den hier dargestellten Fall einer positiven Spannung und einer Last am Ausgang des Stromrichters bedeutet dies, dass ein Vierquadranten-Modul dabei mit positiver Spannung zugeschaltet werden kann, sofern der Ladezustand  $LZ_{\text{Soll}}=J$  („Ja“) dies erlaubt, für  $LZ_{\text{Soll}}=N$  („Nein“) kann das Modul lediglich mit negativer Spannung – also im invertierten Zustand – zugeschaltet werden. Es lässt sich erkennen, dass für jede mögliche Kombination von  $U_{\text{Betrieb}}$  eine jeweils unterschiedliche Schaltabfolge erfolgt.

Im gezeigten Beispiel ändert sich nach jedem Einsatz eines Moduls der Ladezustand des entsprechenden Energiespeicherelementes, so dass jedes Modul nach einer Aufladung in einem der folgenden Schaltzustände wieder entladen wird und umgekehrt. Dies ist natürlich nicht zwingend der Fall, sondern wird durch die Kapazität des Kondensators und den Laststrom bedingt. Entsprechend kann – je nach Kapazität des Kondensators – auch entweder während einer einzelnen Stufe eine (ein- oder mehrmalige) Änderung der Schaltabfolge erforderlich sein oder es kann auch der Fall auftreten, dass sich der Ladezustand von einer Stufe zur nächsten noch nicht verändert.

Beispielsweise startet die Abfolge 1710 mit Energiespeicherelementen, die alle den Ladezustand „J“ aufweisen, während die Abfolge 1780 mit Energiespeicherelementen startet, die alle den Ladezustand „N“ aufweisen.

Das aktiv versorgte Modul kann in jedem Fall in Kombination mit einem oder mehreren Vierquadranten-Modulen negative Spannungen von zugeschalteten Vierquadranten-Modulen ausgleichen.

Entsprechend dem gezeigten Beispiel kann daher jede Stufenspannung mit jeder Kombination an Ladezuständen der Energiespeicherelemente dargestellt werden. Dies gilt natürlich auch für beliebige Anzahlen von Modulen.

Figur 17 verdeutlicht somit anhand eines einfachen Beispiels die große erzielbare Flexibilität und dass eine bestimmte Ausgangsspannung mit völlig unterschiedlichen Modulkonfigurationen erreicht werden kann. Insbesondere verdeutlicht dieses Beispiel die Aufgabe des Controllers ausgehend von Anfangszuständen zur Erzielung eines gewünschten Verlaufs der Ausgangsspannung unterschiedliche Modulkonfigurationen im zeitlichen Verlauf aufeinander abfolgen zu lassen.

#### Ansteuerung der Einzelmodule

Jedes Einzelmodul kann beispielsweise von einer eigenen Steuereinheit angesteuert werden, die über einen potentialfreien bidirektionalen Datenkanal mit einer gemeinsamen Controller-Einrichtung verbunden ist, um einerseits die Schaltelemente zu steuern und andererseits die Spannungswerte des Energiespeicherelementes an die Controller-Einrichtung weiterzuleiten. Alternativ können auch weitere Daten, wie Ströme oder Temperaturen der Bauelemente zur Controller-Einrichtung übertragen werden. Insbesondere ist es zweckmäßig, wenn die Steuereinheiten in den Einzelmodulen direkt über die Spannung an den Klemmen der Einzelmodule oder über DC-DC-Wandler von der Controller-Einrichtung elektrisch versorgt werden. Die Datenübertragung zur gemeinsamen Kontrolleinheit kann z.B. optisch oder auch per Funk erfolgen, um eine galvanische Trennung zu gewährleisten. Alternativ kann auch nur mit einer gemeinsamen Controller-Einrichtung, oder nur mit Modul-bezogenen mehreren einzelnen Steuereinheiten gearbeitet werden.

Ein beispielhafter Steueralgorithmus für den Ablauf zur Erzeugung eines Stufenspannungsverlaufes für eine Phase des Stromrichters lautet wie folgt:

Von  $k = 1$  bis  $z$ :

Bilde für einen gegebenen Zeitverlauf der Sollspannung  $U(t)$  für diskrete Zeitabschnitte  $t_k$  (mit  $t_{k+1} - t_k = \Delta t$ , Länge des Zeitabschnitts) jeweils mögliche gestufte Sollwerte der Ausgangsspannung  $U(t_k)$

Von  $j = 1$  bis  $m$ :

Für jeden Sub-Zeitabschnitt  $t_j$  innerhalb eines Zeitintervalls  $\Delta t$

Von  $i = 1$  bis  $n$

Bestimme für jedes der  $z$  Module die Zustände ob

$U_{\text{Modul-}i} < U_{\text{soll-}i}$  oder  $U_{\text{Modul-}i} > U_{\text{soll-}i}$

(aus Messung oder Berechnung)

next  $i$

Bestimme aus gewünschtem Sollwert der Ausgangsspannung  $U(t_k)$  und den Lade-Zuständen der Module die momentan erforderliche Schaltkonfiguration  $SK_{j,k}$  (aus den entsprechenden Regeln) für alle Module

next  $j$

next  $k$

Hierbei sind drei Schleifen ineinander verschachtelt; die äußerste Schleife läuft von  $k = 1$  bis  $z$  und beschreibt die zeitliche Abfolge der zu erzeugenden Spannungsstufen, die erforderlich sind um einen gewünschten Spannungsverlauf in eine vom Stromrichter darstellbare Stufenfunktion umzuwandeln. Die Längen  $\Delta t$  der Zeitabschnitte dürfen entsprechend dem verwendeten Steueralgorithmus von Schritt zu Schritt variieren. Die zweite Schleife läuft von  $j$

= 1 bis m und bezieht sich auf die Umschaltung von Modulkonfigurationen innerhalb einer Spannungsstufe. Eine solche zeitliche Unterteilung der Stufenfunktion ist insbesondere dann erforderlich, wenn die Modulkondensatoren bereits in dem kurzen Zeitabschnitt einer einzelnen Stufe nachgeladen werden müssen, wie dies beispielsweise in der Figur 16 gezeigt ist. Bei ausreichender Größe der Kondensator-Kapazitäten ist diese zeitliche Unterteilung nicht notwendig, so dass die Tätigkeiten der äußeren Schleife und der mittleren Schleife zusammenfallen können. Die dritte, innerste Schleife läuft von  $i = 1$  bis  $n$  (wobei  $n$  die Anzahl der Module beschreibt) und bestimmt für jeden Modul-Kondensator den momentanen Ladezustand, um zu entscheiden, ob das entsprechende Modul für einen folgenden Zustand so zu schalten ist, dass der Kondensator geladen wird oder entladen wird (wobei sich vor diesem folgenden Zustand noch mehrere Bypass-Zustände dieses Moduls befinden dürfen).

Details zur Energieflussrichtung:

Obige Beschreibung geht regelmäßig von der Betrachtung aus, dass Energie über die Klemmen der Serienschaltung von Modulen an eine Last abgegeben wird, beispielsweise beim Betreiben eines Elektromotors. An verschiedenen Stellen wurde jedoch bereits festgestellt, dass sich die vorliegende Erfindung auch dafür eignet, eine Gleichstromquelle mit Energie zu versorgen, so dass der Energiefluss in umgekehrter Richtung stattfindet, nämlich von den Klemmen der Serienschaltung von Modulen in den Gleichstromkreis. Dies ist beispielsweise beim Bremsvorgang eines Elektrofahrzeugs im so genannten Rekuperationsbetrieb der Fall. In diesem Fall dreht sich die Stromrichtung gegenüber dem Lastfall um. Wenn also im Falle einer Last aus Sicht des Stromrichters – bei Abgabe einer positiven Spannung – vorher die Stromrichtung aus dem Stromrichter erfolgte (positive Stromrichtung), wird sie für den Fall der Umkehr der Energieflussrichtung umgekehrt. D.h. bei gleich bleibend positiver Spannung wird die Stromrichtung negativ. Entsprechendes gilt für den Fall, dass die Spannung an den Ausgangsklemmen negativ ist. In diesem Fall ist bei Anlegen einer Last die Stromrichtung negativ, während sie bei Umkehr der Energieflussrichtung positiv wird. Da sich die Kondensatoren der einzelnen Module – sofern sie nicht in den Bypass-Betrieb geschaltet sind – direkt in diesem Strompfad der Ausgangsklemmen befinden, wird auch das entsprechende Lade- und Entladeverhalten der geschalteten Kondensatoren (Energiespeicherelementen) umgekehrt, falls sich die Energieflussrichtung umkehrt. D.h. ein Modul-Kondensator der invertiert geschaltet wurde, wird bei Stromabgabe an eine Last aufgeladen, während er bei Umkehr der Lastflussrichtung entladen wird. Dies ist von der Controller-Einrichtung, die die Schalteinrichtungen schaltet (und entsprechend dafür sorgt, dass die Spannung jedes Modulkondensators im vorgegebenen Spannungsbereich bleibt) zu berücksichtigen. Diese Betrachtungen gelten sinngemäß auch für kapazitive oder induktive Lasten (bzw. Quellen), bei denen Strom und Spannung nicht exakt in Phase liegen. Entsprechend eines solchen Phasenversatzes dreht sich hier entsprechend der Frequenz des Wechselstromes die

Energieflussrichtung ständig um. Daher ist für die Controller-Einrichtung des Stromrichters die Kenntnis der Momentanwerte von Strom und Spannung hilfreich, um daraus die entsprechenden Steuersignale für die einzelnen Module zu bestimmen.

Ob ein an den Stromrichter (entweder über die Klemmen des Gleichstromkreises oder über die Ausgangsklemmen) angeschlossenes System als Last oder als Quelle wirkt, kann auch über die entsprechenden Momentanwerte der Spannungen zwischen diesem System und den Momentanwerten der Spannungen des Stromrichters bestimmt werden (wobei hierfür zunächst angenommen wird, dass das System noch nicht mit dem Stromrichter verbunden ist). Wenn also beispielsweise der Momentanwert der Spannung des Systems um einen kleinen Wert über der Spannung des Stromrichters liegt, ist ein Stromfluss vom System in den Stromrichter zu erwarten. Diese – typischerweise sehr kleine – Spannungsdifferenz bestimmt damit Richtung und Größe des zu erwartenden Stromes. Entsprechend kann der Stromrichter (oder alternativ eine ebenfalls steuerbare Quelle) die Strom- bzw. die Lastflussrichtung bestimmen. Beispielsweise kann der Stromrichter durch ein geringfügiges Anheben der Spannung im Gleichstromkreis dafür sorgen, dass Energie in den Gleichstromkreis gespeist wird (, um so beispielsweise eine Batterie im Gleichstromkreis aufzuladen). Als ein weiteres Beispiel kann ein Motor/Generator für Gleichstrom betrachtet werden, der mit einer konstant gehaltenen Spannung vom Stromrichter versorgt wird, um so eine bestimmte Drehzahl zu erzeugen. Üblicherweise ist die im Motor/Generator induzierte Spannung direkt proportional zur Drehzahl. Daher wird bei Drehzahlen, die leicht unter der Soll-Drehzahl liegen, die Maschine als Motor arbeiten und Drehmoment (bzw. mechanische Energie) abgeben. Bei leichtem Überschreiten der Soll-Drehzahl geht die Maschine in den generatorischen Betrieb über; das Drehmoment wechselt sein Vorzeichen und mechanische Energie wird aufgenommen. Sinngemäß gilt diese Betrachtung auch für Drehfeld-Maschinen, die mit Drehstrom betrieben werden. Allerdings muss hierbei zusätzlich zur Spannung auch die Frequenz des Drehstromes der Drehzahl der Maschine angepasst werden.

Da der Stromrichter einen gestuften Spannungsverlauf ausgibt, muss – insbesondere bei Verwendung größerer Spannungsstufen (d.h. Stromrichter mit wenigen Modulen) – berücksichtigt werden, dass diese Spannungsstufen gemäß den obigen Betrachtungen auch entsprechende Stromänderungen verursachen. Dies gilt natürlich entsprechend für alle Arten von Stromrichtern, wobei insbesondere PWM-basierte Stromrichter sehr starke Spannungsschwankungen erzeugen. Falls die angeschlossene Quelle bzw. Last nicht ein entsprechend flexibles Verhalten auf solche Spannungsschwankungen aufweist (wie dies beispielsweise ein Motor/Generator über die Induktivität seiner Wicklungen), ist der Einsatz zusätzlicher Filterschaltungen hilfreich, welche den Stromverlauf (bzw. auch den Spannungsverlauf) glätten.

Vorteil bevorzugter Ausführungsformen des erfindungsgemässen Stromrichters gegenüber herkömmlichen modularen Multilevelconvertern:

Bei einem herkömmlichen MMC-basierten Stromrichter sind zur Erzeugung von insgesamt  $n$  Spannungsstufen (einer Polarität) pro Phasenmodul  $2n$  Module notwendig. Es soll beispielsweise ein dreiphasiger Stromrichter, über eine DC-Spannung von  $\pm 320\text{V}$  gespeist werden (damit könnte er jeweils Ausgangsspannungen von  $230\text{V}$ ~ gegen Masse erzeugen). Die Spannungsstufen sollen eine Höhe von  $20\text{V}$  aufweisen, wodurch die Ausgangsspannung in 16 positiven Spannungsstufen (bzw. insgesamt in 33 Stufen, siehe auch Figur 11) dargestellt werden kann.

Bei einem herkömmlichen modularen Multilevelconverter, bestehend aus 2-Quadrantenmodulen müssten sich hierfür in jedem Brückenweig 32 Module mit einer Spannungsfestigkeit von je  $20\text{V}$  befinden: Wenn eine Spannung von  $0\text{V}$  gegen Masse ausgegeben wird, sind sowohl im oberen als auch im unteren Brückenweig jeweils 16 Module aktiv geschaltet ( $16 \times 20\text{V} = 320\text{V}$ ) und 16 Module auf Bypass geschaltet. Wenn die maximale Spannung von  $320\text{V}$  ausgegeben werden soll, sind im oberen Brückenweig sämtliche 32 Module in den Bypass-Betrieb geschaltet, während im unteren Brückenweig alle 32 Module aktiv geschaltet ( $32 \times 20\text{V} = 640\text{V}$ ) sein müssen. Zur Ausgabe der maximalen negativen Spannung von  $-320\text{V}$  ist es genau umgekehrt; hier müssen alle Module des positiven Brückenweiges aktiv geschaltet werden und alle Module des negativen Zweiges auf Bypass-Betrieb. Daher werden für einen dreiphasigen Stromrichter mit dieser Stufenzahl insgesamt  $2 \times 3 \times 32 = 192$  Module benötigen. Hierfür wären 384 Transistoren, 192 Modul-Kondensatoren und (mindestens) 192 Spannungsebenen (je mindestens eines pro 2-Quadrantenmodul, da sich u.U. benachbarte Module immer eine Spannungsebene teilen können) zur Versorgung der Transistortreiber notwendig.

Ein dreiphasiger Stromrichter entsprechend der vorliegenden Erfindung, der diese Ausgangsspannung liefern soll, benötigt dagegen pro Phase nur 5 Module, davon 3 aktiv versorgte Module (mit beispielsweise je 6 Transistoren) und 4 Kondensatormodule (mit je 4 Transistoren). Für das dreiphasige System werden also 15 Module benötigt. Hierfür wären 66 Transistoren, 12 bis 15 Modul-Kondensatoren (die Versorgungsmodule benötigen nicht zwingend einen Kondensator) und 36 Spannungsebenen (je zwei für jedes 4-Quadrantenmodul) zur Versorgung notwendig.

Die gesamte Spannungsfestigkeit aller Transistoren zusammen ist dabei mit dem zweifachen der DC-Zwischenkreisspannung (pro Phase) bei beiden verglichenen Schaltungstypen gleich. Allerdings kann durch die neue Schaltung der Bauteileaufwand erheblich reduziert werden. Dies reduziert die Kosten des Stromrichters; insbesondere sinkt der Aufwand für das Bereitstellen der potentialfreien Versorgungen der einzelnen Module (z.B. über DC-DC-

Wandler). Das obige Beispiel zeigt also einen Fall, bei dem – im Falle der Verwendung des der erfindungsgemäßen Schaltung – auch für die Spannungsfestigkeit des Moduls mit der höchsten Spannung konventionelle Bauteile (u.a. MOSFETs) eingesetzt werden können. Dies könnte ein Stromrichter für Drehstrom sein, der bei 10A-DC pro Strang eine Leistung von knapp 10kW umsetzt

Zusammenstellung weiterer Vorteile bevorzugter Ausführungsformen:

- Die Schaltungstopologie der Einzelmodule gewährt durch die Energiespeicherelemente und die Dioden, die parallel zu den Transistorschaltern liegen einen Überspannungsschutz gegenüber den Ein-/Ausgängen (Tiefpasswirkung);
- Ausfallsicherheit durch mögliche Ausnutzung von Redundanzen über die Steuerung (Einbau zusätzlicher Ersatz-Module oder Änderung der Betriebsweise, so dass Module die Funktionalität von anderen ausgefallenen Modulen übernehmen können);
- das System ist auch am Ausgang DC-fähig, es kann also auch eine einstellbare Gleichspannung liefern;
- bei Verwendung geeigneter aktiv versorgter Module können Stromrichter für ein- oder mehrphasige Netze mit beliebiger Phasenzahl aufgebaut werden;
- zwei einzelne Stromrichter können nach Art eines Back-to-Back-Converters über den Gleichstromkreis verbunden werden und so elektrische Energie beliebiger Spannung, Frequenz und Phasenzahl bidirektional von einem zum anderen Stromrichter übertragen.
- an den Ausgangsklemmen können - bei Abstufung der Modulspannungen nach Zweierpotenzen – mit wenigen Modulen eine große Zahl äquidistanter Spannungsstufen ausgegeben werden (bei n Modulen:  $2^{(n-1)}$ ), um so einen feinstufigen Verlauf der Ausgangsspannung zu erzeugen;
- das System ist bidirektional; d.h. über die Ausgangsklemmen kann sowohl Energie abgegeben, als auch zugeführt werden. Insbesondere kann aus einer kleinen eingespeisten Spannung eine deutlich größere Spannung im Gleichspannungskreis erzeugt werden (diese Eigenschaft ist beispielsweise sehr vorteilhaft für den Rekuperationsmodus von Elektrofahrzeugen bei niedrigen Geschwindigkeiten);
- die Kapazität der Kondensatoren (allg. Speichereinrichtungen) wird durch die tolerierten Spannungseinbrüche im Betrieb und durch die Schaltfrequenz des Stromrichters festgelegt; sie ist jedoch nicht abhängig von der Frequenz einer ausgegebenen Wechselfspannung. Daher können – bei entsprechend hoch gewählter Schaltfrequenz – die Kapazitäten der Kondensatoren sehr klein sein, wodurch wiederum eine extrem kompakte Bauweise des Stromrichters möglich ist;

- die Kondensatoren werden nur in einer Spannungsrichtung genutzt, daher können in bestimmten Anwendungsfällen auch Elektrolytkondensatoren oder Akkumulatoren eingesetzt werden.
- entsprechend dem fein gestuften Spannungsverlauf ist oft nahezu keine Filterung an den Anschlüssen des Stromrichters nötig. Weiterhin kann sich eine Filterschaltung die Tatsache zu nutze machen, dass der Stromrichter nach dem Prinzip einer PWM-Regelung ständig (und mit hoher Frequenz) zwischen einer leicht zu großen und einer leicht zu kleinen Spannungsstufe (entsprechend dem Spannungshub des Moduls mit der kleinsten Spannung) hin- und herschaltet. Die Pulsweitenmodulation erfolgt daher im Vergleich zu einem konventionellen PWM-Stromrichter nicht mit dem vollen Spannungshub, sondern vorzugsweise nur mit der Amplitude der kleinsten Stufe. Die Filterschaltung muss daher – wegen einer möglichen hohen Schaltfrequenz und einer kleinen zu glättenden Spannungsdifferenz – nur wenig Energie speichern und kann daher sehr klein ausgeführt werden.
- durch Hinzufügen eines zusätzlichen (z.B. längsgeregelten) analogen Moduls können kontinuierliche Ausgangsspannungen erzeugt werden. Der Spannungshub eines solchen Analogmoduls muss nur unwesentlich größer sein, als der Spannungswert des Moduls mit der kleinsten Spannung. Solche Spannungen lassen sich auch bei hohen Strömen relativ einfach über Leistungstransistoren längsregeln. Alternativ kann auch nur das Modul mit der kleinsten Spannung als PWM-Modul betrieben werden, um die Schaltverluste gering zu halten. Eine weitere Alternative besteht darin, dass - an Stelle des Analogmoduls - ein dediziertes zusätzliches PWM-Modul hinzugefügt wird. Der zu erreichende Spannungshub dieses Moduls muss dabei auch wieder nur in dem Spannungsbereich des Moduls der kleinsten Spannungsstufe liegen.
- für die Steuerung muss bzgl. der Spannungen der einzelnen Module lediglich überprüft werden, ob diese oberhalb oder unterhalb einer jeweiligen Toleranzschwelle liegt, so dass hier zur Messung der Modulspannung beispielsweise einfache Komparatoren an Stelle von AD-Wandlern eingesetzt werden können;
- alternativ können für die Steuerung auch Algorithmen eingesetzt werden, die aus der gemessenen Spannung und den Strom an den Ausgangsklemmen des Stromrichters auf die Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente der Module rückschließen. Hierfür muss einerseits berücksichtigt werden, welche Module gerade aktiv beteiligt sind und weiterhin über den gemessenen Strom die Änderung der Spannung der Energiespeicherelemente extrapoliert werden. Über eine größere Zahl von geschalteten Stufen können dann ausreichend genau die Spannungen der einzelnen Energiespeicherelemente berechnet werden.

- Falls die Anforderungen an die Genauigkeit der auszugebenden Spannung es zulassen, kann ein entsprechender Stromrichter wahlweise auch so betrieben werden, dass - angefangen mit dem Modul der kleinsten Spannung - eines oder mehrere Module auf reinen Durchlassbetrieb geschaltet werden (d.h. also Bypass). In diesem Fall sind die schaltbaren Spannungsstufen größer (da nur eine geringere Anzahl an Modulen an der Stufenbildung teilnehmen), aber dafür sinkt einerseits die Anzahl der Schaltvorgänge deutlich; weiterhin fallen die Kondensatorverluste der überbrückten Module weg. Eine solche Vorgehensweise kann beispielsweise bei einem Fahrzeugstromrichter von Vorteil sein, wenn dieser gleichzeitig als Ladegerät verwendet wird. In der Funktionalität als Antriebsstromrichter sind möglicherweise gröbere Spannungsstufen zulässig als in der Funktionalität als Ladegerät, da hier strenge Normen der Netzqualität eingehalten werden müssen. Im Extremfall könnte sogar die elektrische Maschine im reinen PWM-Betrieb (u.U. nur von jeweils einem Modul pro Phase) angesteuert werden (wobei sich die restlichen Module u.U. nur im Ladekreis befinden). Weiterhin kann eine solche Vorgehensweise auch vorteilhaft sein, wenn der Stromrichter Wechselspannungen mit sehr unterschiedlicher Amplitude ausgeben soll. Bei großer Amplitude können dann ggf. die kleinsten Stufen weggelassen werden, während sie bei Ausgabe von kleinen Spannungsamplituden aktiviert werden.
- Wenn die Auslegungen der Spannungsfestigkeiten der Module es zulassen, erlaubt das vorgestellte System auch eine dynamische Anpassung der einzelnen Modulspannungen an spezielle Erfordernisse. Auf diese Weise können bei Bedarf auch nicht-äquidistante Spannungsstufungen erreicht werden.

#### Ausgewählte Anwendungsgebiete

Wegen Eigenschaften wie der einfachen Skalierbarkeit bietet sich für dieses System ein äußerst breites Anwendungsgebiet, das von Kleinspannungswandlung, Fahrzeuganwendungen bis zur Hochspannungsebene reicht (Bahnverkehr, DC-Anlagen, Netzkopplungen, Leistungskompensation, Netzkopplung unterschiedlicher Spannungen und Frequenzen etc.).

Insbesondere für Stromrichter kleiner und mittlerer Leistungen für den Niederspannungsbereich mit Spannungen im Gleichspannungskreis bis ca. 800V (für das Modul der höchsten Spannungsstufe) können MOSFETs als schaltende Elemente eingesetzt werden; bei Spannungen bis ca. 2000V kann mit IGBTs gearbeitet werden. Bei einer Spannung im DC-Kreis von  $UDC = +/-800V$  und einem DC-Strombedarf von 50A pro Strang kann ein solcher Stromrichter eine Leistung von  $ca. 3 \times 800V \times 50A = 120kW$  bei variabler Frequenz und variabler Ausgangsspannung (im Bereich von 0 bis 566V Strangspannung bzw. 980V verkettete Spannung) steuern. Damit eignen sich solche Stromrichter für Niederspannungs-Anwendungen bei denen Dreh- oder Wechselspannung mit einem

verlustarmen lokalen Gleichspannungssystem ausgetauscht werden soll, wie es beispielsweise in künftigen Verteilnetzen vermehrt eingesetzt werden soll. Beispielsweise können so Hausanschlüsse mit typischen Netzdrehspannungen mit einem lokalen Gleichstromnetz verbunden werden.

Der vorgestellte Stromrichter eignet sich weiterhin als Solarstromrichter. Ein solcher muss die Gleichspannung einer Photovoltaik-Anlage in eine mit dem Netz synchronisierte Wechselspannung umwandeln. Gleichzeitig sollte die Gleichspannung direkt an die aktuelle Leistung der Solarzellen angepasst werden (Maximum-Power-Point-Tracking). Diese Funktionalitäten können mit dem vorliegenden System ohne zusätzliche Gleichspannungswandler oder Transformatoren gewährleistet werden.

Ein breites Einsatzfeld ergibt sich auch im Bereich der Elektromobilität. Der Stromrichter ist kompakt, verursacht geringere EMV-Störungen, kann sowohl für den Antrieb der E-Maschine von Elektroautos als auch für das Laden der Batterie mit sehr hoher Leistung eingesetzt werden. Außerdem kann er auch bei niedrigen Drehzahlen bzw. Geschwindigkeiten noch sehr gut rekuperieren, ohne dass ein externer DC/DC-Wandler erforderlich ist. Möglich ist auch eine Kopplung von zwei Funktionalitäten: Im Fahrbetrieb kann die Maschine per PWM angesteuert werden; das Laden erfolgt im Multilevelmodus. Da auch viele Schienen-basierte Fahrzeuge wie z.B. Straßenbahnen mit Gleichstrom von wenigen kV versorgt werden, können auch hier vorteilhaft Stromrichter nach dem vorgestellten System eingesetzt werden, um Drehstrommotoren für den Antrieb zu steuern.

Weiterhin können die vorgestellten Stromrichter auch in Windenergieanlagen eingesetzt werden. Hier erzeugt der mit dem Windrad verbundene Generator eine Drehspannung mit variabler Frequenz. Die elektrische Energie wird dabei entweder in ein lokales Gleichstromnetz eingespeist (beispielsweise bei Offshore Windparks) oder direkt in das lokale mehrphasige Wechselstromnetz. Im ersten Fall kann ein entsprechender Mehrphasiger Stromrichter eingesetzt werden, der die ausgegebene Gleichspannung an das Gleichstromnetz anpasst. Im zweiten Fall kann entweder ein Back-to-Back-Converter eingesetzt werden, welcher die mehrphasige Wechselspannung der Windenergieanlage in eine mehrphasige Wechselspannung geeigneter Spannung und Frequenz umwandelt und in das Wechselstromnetz einspeist. Alternativ kann auch ein einfacher Gleichrichter mit einem als Wechselrichter geschalteten Stromrichter kombiniert werden.

Eine weitere mögliche Anwendung von Stromrichtern nach dem vorgestellten Prinzip sind Audio-Verstärker-Anlagen hoher Leistung: Für gute Klangqualität ist ein 16- oder sogar 20-bit System nicht realistisch, da das Laden und Entladen der einzelnen Module nicht mit hinreichender Genauigkeit zu bewerkstelligen ist. Allerdings könnte mit einem 6- bis 8-bit System in Zusammenarbeit mit einem Analogmodul die geforderte Genauigkeit leicht erreicht

werden, in dem der Ausgang über einen entsprechenden Regler rückgeführt wird und damit das Analogmodul gesteuert wird. Die Steuerung der Stromrichtermodule kann dann aus den Signalwerten des Analogmoduls direkt abgeleitet werden, da sie schnell genug vonstatten geht, so dass das Analogmodul nicht über seine Spannungsgrenze hinauskommt. Der Leistungsbedarf des Analogmoduls ist dann entsprechend wesentlich kleiner als der der gesamten Anlage. Außerdem lassen sich bei so niedrigen Spannungen die entsprechenden Leistungstransistoren mit deutlich höheren Strömen beaufschlagen ohne dass sie instabil werden.

Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird ein Stromrichter vorgeschlagen:

Modularer Stromrichter zur Ausgabe unterschiedlicher Spannungslevels, mit mindestens einem aktiv zu versorgenden Hauptmodul mit Eingangsanschlüssen für das Anlegen einer Eingangsspannung  $U_0$  für den Stromrichter,  $n-1$  weiteren Modulen, wobei  $n$  ganzzahlig ist und gilt  $n \geq 2$ , alle mindestens  $n$  Module seriell miteinander verschaltet sind, Ausgangsanschlüsse an den beiden Endpunkten der Serienschaltung, wobei zumindest jedes der  $n-1$  weiteren Module 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 des Stromrichters 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 unterschiedlich sind und vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen zueinander abgestuft sind, entsprechend  $U_0$ ,  $U_0/2$ ,  $U_0/4$ ,  $U_0/8$  etc.

Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren vorgeschlagen:

Verfahren zum Betreiben eines Stromrichters,

wobei der Stromrichter mindestens ein aktiv zu versorgendes Hauptmodul mit Eingangsanschlüssen für das Anlegen einer Eingangsspannung für den Stromrichter und  $n-1$  weitere Module aufweist, wobei  $n$  ganzzahlig ist und gilt  $n \geq 2$ ,

wobei es sich zumindest bei den  $n-1$  weiteren Modulen vorzugsweise um Vierquadrantenmodule handelt und zumindest jedes der  $n-1$  weiteren Module eine Energiespeichereinrichtung, vorzugsweise einen Kondensator zum Speichern von Ladung aufweist sowie 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 einbringt, eines Bypass-Betriebs in dem das jeweilige Modul nur durchschaltet sowie vorzugsweise eines invertierten Betriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung invertiert in den Spannungspfad einbringt,

und wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Verschalten der  $n$  Module in Serie,

Anlegen einer Gleichspannung  $U_0$  an die Eingangsanschlüsse des Hauptmoduls,

Vorgeben eines gewünschten zeitlichen Verlaufs der Ausgangsspannung in Bezug auf die Amplitude über die Zeit,

Abgreifen der Ausgangsspannung an den beiden Endpunkten der Serienschaltung der Module,

Aufrechterhalten vorbestimmter Ladungszustände für die einzelnen Module, derart, dass jedes Modul in seinem aktiven Betriebszustand, im wesentlichen einen vorgegebenen Spannungsbeitrag zur Serienschaltung leistet, wobei die Spannungsbeiträge der Module unterschiedlich zueinander sind und vorzugsweise entsprechend Zweierpotenzen gegeneinander abgestuft sind,

Ansteuern der Schalteinrichtungen der Module, um jedes Modul jeweils in einen Betriebszustand zu schalten, derart, dass die Summe der einzelnen Modulspannungen wie sie durch die Energiespeichereinrichtung jedes Moduls entsprechend seines aktiven, invertierten oder Bypass-Betriebs bereitgestellt wird, in jedem Zeitpunkt dem vorgegebenen Bereich der Ausgangsspannung entspricht.

## Patentansprüche

### 1. Modularer Stromrichter zur Ausgabe unterschiedlicher Spannungslevels, mit

mindestens einem aktiv zu versorgenden Hauptmodul mit Eingangsanschlüssen für das Anlegen einer Eingangsspannung  $U_0$  für den Stromrichter,

$n-1$  weiteren Modulen, wobei  $n$  ganzzahlig ist und gilt  $n \geq 2$ ,

alle mindestens  $n$  Module seriell miteinander verschaltet sind,

Ausgangsanschlüsse an den beiden Endpunkten der Serienschaltung,

wobei zumindest jedes der  $n-1$  weiteren Module 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 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 Module und zum Steuern der Schaltzustände der Schalteinrichtungen aller Module, um für jedes Modul 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 des Stromrichters 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 unterschiedlich sind und vorzugsweise gemäß Zweierpotenzen zueinander abgestuft sind, entsprechend  $U_0$ ,  $U_0/2$ ,  $U_0/4$ ,  $U_0/8$  etc., 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 und ohne Veränderung der resultierenden Ausgangsspannungsstufe in den invertierten Betriebszustand zu schalten, um dadurch die Nachladung des betreffenden Moduls bei gleichbleibender Ausgangsspannungsstufe zu ermöglichen.

2. Stromrichter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Energiespeichereinrichtungen durch Kondensatoren gebildet werden und die Ladekonstante der verwendeten Kondensatoren klein gegenüber der Zykluszeit der Ausgangsspannung ist und ein übermässiges Entladen der Kapazitäten durch mehrmaligen Modulkonfigurationswechsel pro Ausgangsspannungsstufe vermieden wird, indem einzelne Kondensatoren während einer gleichbleibenden Ausgangsspannungsstufe sowohl entladen als auch wieder aufgeladen werden.
3. Stromrichter nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltfrequenz des Modulkonfigurationswechsels gross gegenüber der Ausgangsspannungsfrequenz ist, um mehrere Konfigurationswechsel pro Ausgangsspannungsstufe zu ermöglichen.
4. Stromrichter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei zumindest die  $n-1$  weiteren Module als Vierquadrantenmodule mit Normalbetrieb, Bypass-Betrieb und invertiertem Betrieb ausgelegt sind und die Spannungsbeiträge aller Module gegeneinander gemäß Zweierpotenzen abgestuft sind.
5. Stromrichter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Module gestaffelt miteinander verschaltet sind derart, dass eine Verschaltung in der Reihenfolge der entsprechend den darstellbaren Spannungsstufen erfolgt.
6. Stromrichter nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Module insbesondere hinsichtlich ihrer Speichereinrichtung auf den ihnen zugewiesenen Spannungsbeitrag hin dimensioniert sind.

7. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei an den Eingangsanschlüssen eine Gleichspannung  $U_0$  anliegt und an den Ausgangsanschlüssen eine Wechselspannung im Bereich  $[-U_0, +U_0]$  anliegt, welche gesteuert über das Schaltverhalten der Module und die mit ihnen erzielbaren Schaltstufen nahezu beliebige Frequenz annehmen kann, vorzugsweise einschließlich der Möglichkeit eine Gleichspannung am Ausgang dazustellen.
8. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Controller-Einrichtung programmierbar ist um entsprechend den Anforderungen, beispielsweise dem gewünschten Fahrverhalten eines Elektroautos, unterschiedliche Stromrichterfunktionen zu bewirken.
9. Stromrichter nach Anspruch 4 mit einem Hauptmodul und  $n-1$  weiteren Modulen, wobei die Anzahl der darstellbaren Stufen im Ausgangssignal  $2^n + 1$  ist.
10. Stromrichter nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei eine bestimmte Ausgangsspannung am Ausgang nahezu unabhängig von den tatsächlichen elektrischen Eigenschaften der Speichereinrichtungen der Module beliebig lange gehalten werden kann, indem zwischen für diesen bestimmten Ausgangsspannungsbereich geeigneten Modulkonfigurationen mit einer Schaltfrequenz hin- und hergeschaltet wird, die hoch genug ist, um sicherzustellen, dass jedes Modul früh genug über seinen invertierten Betriebszustand nachgeladen wird, bevor es möglich ist, dass die Ausgangsspannung aufgrund übermäßiger Entladung einzelner Module den gewünschten Bereich verlässt.
11. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest alle weiteren  $n-1$  Module gleich aufgebaut sind, vorzugsweise zusätzlich auch das Hauptmodul.
12. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Ändern der Schaltzustände der Module über einen gemeinsamen vorgegebenen Takt erfolgt und der vorgegebene Takt abgestimmt ist auf eine gewünschte Ausgangsfrequenz der Spannung und die Ladecharakteristiken der Energiespeichereinrichtungen der Module.
13. Stromrichter 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, vorzugsweise auch dem vorhergehenden Schaltzustand der Module sowie des Laststroms erfolgt.

14. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer Filtereinrichtung, die zwischen die Ausgänge des Stromrichters und die anzulegende Last geschaltet ist.
15. Stromrichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend mehrere Phasen, gebildet aus jeweils entsprechenden mehreren Modulketten, wobei jede Phase des Stromrichters mit einer Phase einer Last oder einer Quelle verbunden ist.
16. Stromrichter nach Anspruch 15, wobei die Last ein drei- oder mehrphasiger Elektromotor ist bzw. die Quelle ein drei- oder mehrphasiger Generator ist.
17. Stromrichter nach Anspruch 15 oder 16, wobei das Hauptmodul jeder Phase als Mehrphasenmodul ausgeführt ist und eine Klemme für eine Mittelanzapfung der Gleichspannungsversorgung aufweist, wobei dieses Spannungspotential dem Sternpunkt entsprechen kann.
18. Stromrichter nach Anspruch 17, wobei das Mehrphasenmodul 6 Schalteinrichtungen, vorzugsweise durch Transistoren gebildet aufweist.
19. Stromrichter nach einem der Ansprüche 1-18, dadurch gekennzeichnet, dass für jedes Spannungslevel, ausser für das maximale Spannungslevel, das minimale Spannungslevel und für Nullspannung pro Spannungslevel mindestens zweimal, vorzugsweise mehrfach und besonders bevorzugt zwischen 5 und 15-mal, bevorzugt etwa 10-mal, die Modulkonfiguration gewechselt wird.
20. Stromrichter nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass ein bestimmtes Spannungslevel beliebig lange beibehalten werden kann und die Kondensatoren sämtlicher hierfür verwendeter Modulkonfigurationen über den entsprechenden invertierten Betrieb regelmässig nachgeladen werden.
21. Stromrichter nach Anspruch 19 oder 20, dass die verwendeten Kondensatoren über eine verhältnismässig kleine Kapazität haben können indem die Schaltfrequenz mit der die Modulkonfigurationen gewechselt werden und somit Nachladungen erfolgen, hoch gegenüber der Frequenz der darzustellenden Ausgangsspannungsfrequenz ist.
22. Stromrichter nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Ladezeit der Kondensatoren um Faktor 100, vorzugsweise Faktor 1000 kürzer ist, als die Periodendauer der darzustellenden Ausgangsspannung.

23. Stromrichter zur AC/AC Wandelung, mit zwei Stromrichtern nach einem der Ansprüche 1-15, welche über ihre Gleichspannungskreise miteinander verbunden sind.
24. Elektromotor mit einem Stromrichter nach einem der Ansprüche 15-17.
25. Elektrofahrzeug, insbesondere E-Mobil, mit einer Batterieeinrichtung, einem Elektromotor und einem Stromrichter nach einem der Ansprüche 1- 22.
26. System zur Wandelung eines über eine Stromtrasse gelieferten Wechselstroms in Gleichstrom zur lokalen Versorgung einer Gebäudeansammlung mit Gleichstrom, mittels eines Stromrichters nach einem der Ansprüche 1-18.
27. Windkraftanlage mit einem Stromrichter nach einem der Ansprüche 1-22.
28. Photovoltaik-System bestehend aus einer Photovoltaik-Stromerzeugungseinrichtung, einer Batterieeinrichtung, einer Controllereinrichtung zum Steuern der Ladung der Batterieeinrichtung durch den erzeugten Strom sowie eines Stromrichters nach einem der Ansprüche 1-22 der mit der Batterieeinrichtung über die Eingangsklemmen seines Hauptmoduls gekoppelt ist, und am Ausgang des Stromrichters eine Wechselspannung mit einstellbarer Frequenz liefert.
29. Verfahren zum Betreiben eines Stromrichters,

wobei der Stromrichter mindestens ein aktiv zu versorgendes Hauptmodul mit Eingangsanschlüssen für das Anlegen einer Eingangsspannung für den Stromrichter und  $n-1$  weitere Module aufweist, wobei  $n$  ganzzahlig ist und gilt  $n \geq 2$ ,

wobei es sich zumindest bei den  $n-1$  weiteren Modulen vorzugsweise um Vierquadrantenmodule handelt und zumindest jedes der  $n-1$  weiteren Module eine Energiespeichereinrichtung, vorzugsweise einen Kondensator zum Speichern von Ladung aufweist sowie 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 einbringt, eines Bypass-Betriebs in dem das jeweilige Modul nur durchschaltet sowie eines invertierten Betriebs bei dem das jeweilige Modul die Spannung an seiner Energiespeichereinrichtung invertiert in den Spannungspfad einbringt,

und wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

Verschalten der n Module in Serie,

Anlegen einer Gleichspannung  $U_0$  an die Eingangsanschlüsse des Hauptmoduls,

Vorgeben eines gewünschten zeitlichen Verlaufs der Ausgangsspannung in Bezug auf die Amplitude über die Zeit,

Abgreifen der Ausgangsspannung an den beiden Endpunkten der Serienschaltung der Module,

Aufrechterhalten vorbestimmter Ladungszustände für die einzelnen Module, derart, dass jedes Modul in seinem aktiven Betriebszustand, im wesentlichen einen vorgegebenen Spannungsbeitrag zur Serienschaltung leistet, wobei die Spannungsbeiträge der Module unterschiedlich zueinander sind und vorzugsweise entsprechend Zweierpotenzen gegeneinander abgestuft sind,

Ansteuern der Schalteinrichtungen der Module, um jedes Modul jeweils in einen Betriebszustand zu schalten, derart, dass die Summe der einzelnen Modulspannungen wie sie durch die Energiespeichereinrichtung jedes Moduls entsprechend seines aktiven, invertierten oder Bypass-Betriebs bereitgestellt wird, in jedem Zeitpunkt dem vorgegebenen Bereich der Ausgangsspannung entspricht, 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 und ohne Veränderung der resultierenden Ausgangsspannungsstufe in den invertierten Betriebszustand zu schalten, um dadurch die Nachladung des betreffenden Moduls bei gleichbleibender Ausgangsspannungsstufe zu ermöglichen.

30. Verfahren nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass die Energiespeichereinrichtungen durch Kondensatoren gebildet werden und die Ladekonstante der verwendeten Kondensatoren klein gegenüber der Zykluszeit der Ausgangsspannung ist und ein übermässiges Entladen der Kapazitäten durch mehrmaligen Modulkonfigurationswechsel pro Ausgangsspannungsstufe vermieden wird, indem einzelne Kondensatoren während einer gleichbleibenden Ausgangsspannungsstufe sowohl entladen als auch wieder aufgeladen werden.
31. Verfahren nach Anspruch 29 oder 30, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltfrequenz des Modulkonfigurationswechsels gross gegenüber der Ausgangsspannungsfrequenz ist, um mehrere Konfigurationswechsel pro Ausgangsspannungsstufe zu ermöglichen.
32. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 31, wobei das Aufrechterhalten vorbestimmter Ladungszustände der Module dadurch erzielt wird, indem das jeweilige Modul, nachdem ein Absinken seiner Modulspannung unter einen vorgegeben ersten Wert erfasst wird in seinen invertierten Betrieb geschaltet wird, um ein Nachladen zu ermöglichen und bei Überschreiten eines vorgegebenen zweiten Wertes der Modulspannung, in entweder den aktiven Betrieb oder Standby-Betrieb geschaltet wird, um dadurch einen vorgegebenen Spannungsbereich zu halten.
33. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 32, wobei alle Module zu gleichen Zeiten geschaltet werden.
34. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 33, wobei eine Ausgangsspannung über mindestens zwei aufeinanderfolgende Schaltperioden im wesentlichen unverändert innerhalb einer Stufe gehalten wird, hierzu aber aufeinanderfolgend zwei unterschiedliche Schaltkonfigurationen für die Module verwendet werden, um dadurch mindestens ein Modul, welches in der ersten Schaltperiode im aktiven Betrieb war, in der zweiten Periode in den invertierten Betrieb zu schalten, um dadurch trotz im wesentlichen gleichbleibender Ausgangsspannung dieses Modul nachladen zu können.
35. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 34, wobei der Stromrichter durch Gleichbelassen der resultierenden Ausgangsspannung eine einstellbare, konstante Ausgangsgleichspannung bei wechselnden Modulkonfigurationen liefert.

36. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-35, wobei die Modulspannungen der n Module nach Zweierpotenzen zur Darstellung der Spannungswerte  $U_0$ ,  $U_0/2$ ,  $U_0/4 \dots U_0/2^{n-1}$  gestaffelt sind.
37. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-36, wobei zusätzlich eine Pulsweitenmodulation über die Schaltzustände der Module aufgebracht wird, zur weiteren Glättung der Ausgangsspannung.
38. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-37, wobei zwei derartige Stromrichter über ihre Gleichspannungsseite zusammengeschaltet werden zur Erzielung einer AC/AC Wandelung.
39. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-38, wobei der Stromrichter als DC/DC Wandler eingesetzt wird.
40. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-39, dadurch gekennzeichnet, dass für jedes Spannungslevel, ausser für das maximale Spannungslevel, das minimale Spannungslevel und für Nullspannung pro Spannungslevel mindestens zweimal, vorzugsweise mehrfach und besonders bevorzugt zwischen 5 und 15-mal, bevorzugt etwa 10-mal, die Modulkonfiguration gewechselt wird.
41. Verfahren nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass ein bestimmtes Spannungslevel beliebig lange beibehalten werden kann und die Kondensatoren sämtlicher hierfür verwendeter Modulkonfigurationen über den entsprechenden invertierten Betrieb regelmässig nachgeladen werden.
42. Verfahren nach Anspruch 40 oder 41, dass die verwendeten Kondensatoren über eine verhältnismässig kleine Kapazität haben können indem die Schaltfrequenz mit der die Modulkonfigurationen gewechselt werden und somit Nachladungen erfolgen, hoch gegenüber der Frequenz der darzustellenden Ausgangsspannungsfrequenz ist.
43. Verfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, dass die Ladezeit der Kondensatoren um Faktor 100, vorzugsweise Faktor 1000 kürzer ist, als die Periodendauer der darzustellenden Ausgangsspannung.
44. Verfahren nach einem der Ansprüche 29-43, wobei der Stromrichter zur Einspeisung von Energie in die Gleichstromversorgung mit negativem Laststrom betrieben wird.

45. Verfahren nach Anspruch 44, wobei die Controller- Einrichtung zur Schaltung der Module diese Vorzeichenumkehr berücksichtigt.
46. Stromrichtermodul, vorzugsweise Vierquadrantenmodul, zur Verwendung in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 29-45.
47. Stromrichtermodul nach Anspruch 46, wobei es sich bei der Energiespeichereinheit um einen Kondensator handelt und das Modul zwei Modulklemmen für die serielle Verschaltung mit weiteren Modulen sowie einen Eingang für Steuersignale zum Steuern der Schalteinrichtungen aufweist.
48. Seriell vorverschaltete Modulkonfiguration bestehend aus Stromrichtermodulen nach Anspruch 46 oder 47 zur Verwendung in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 27-38.
49. Controller-Einrichtung zur Verwendung in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 29-45, zur Steuerung der Schaltzustände sämtlicher Module.
50. Controller-Einrichtung, nach Anspruch 49, wobei die Controller-Einrichtung programmierbar ist, um den Stromrichter für unterschiedliche Zwecke, insbesondere Ausgangsfrequenzen betreiben zu können.
51. Controller-Einrichtung, nach Anspruch 49 oder 50, wobei die Controller-Einrichtung vorzugsweise über Funk umschaltbar ist, um während des Betriebs eines Stromrichters, dessen Betriebsweise umstellen zu können.

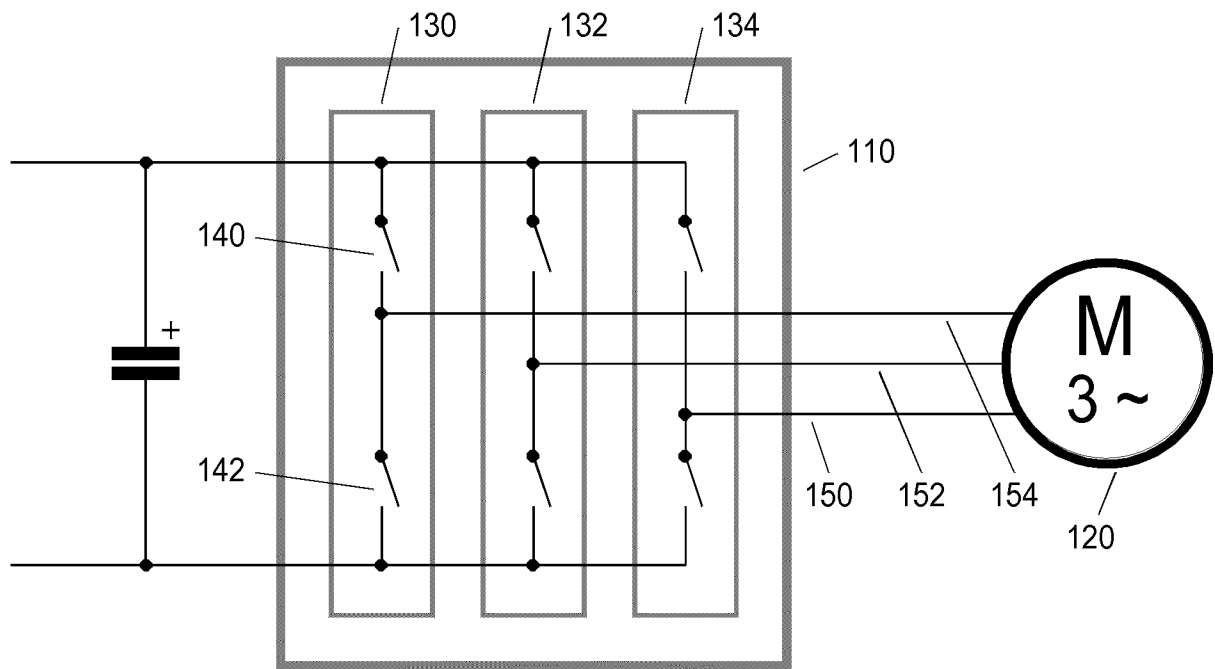


FIG. 1

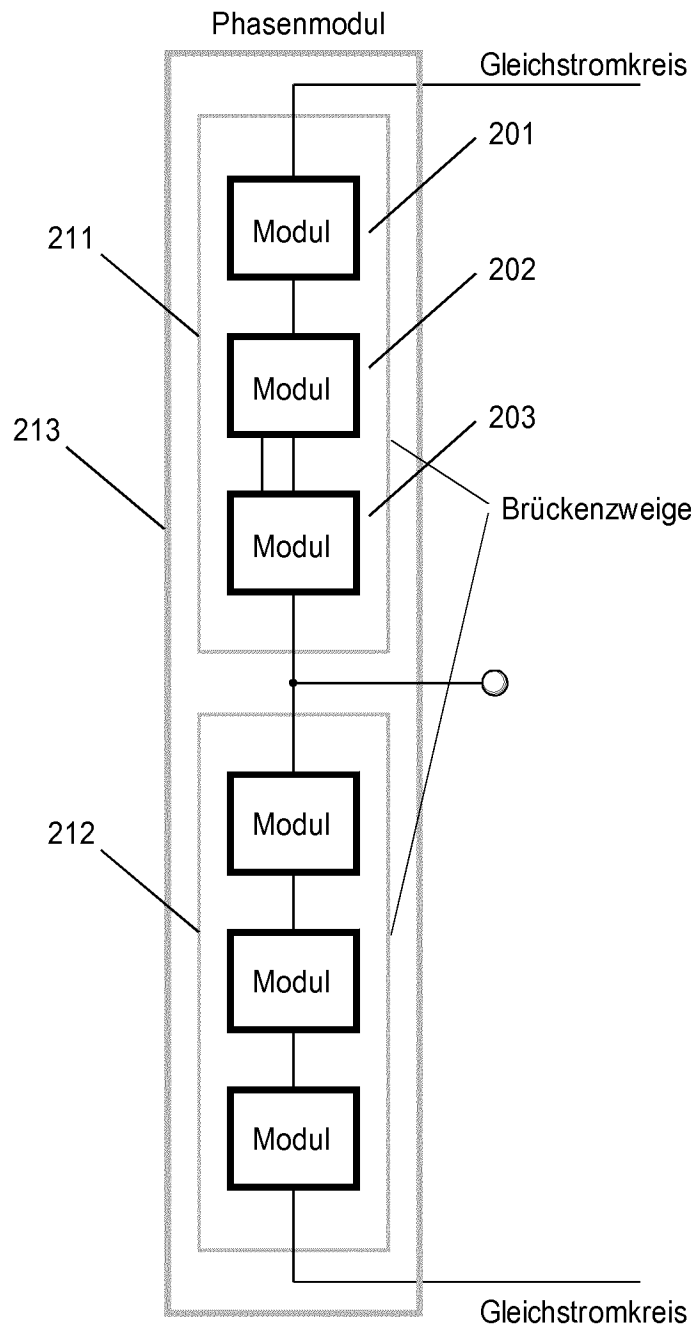


FIG. 2

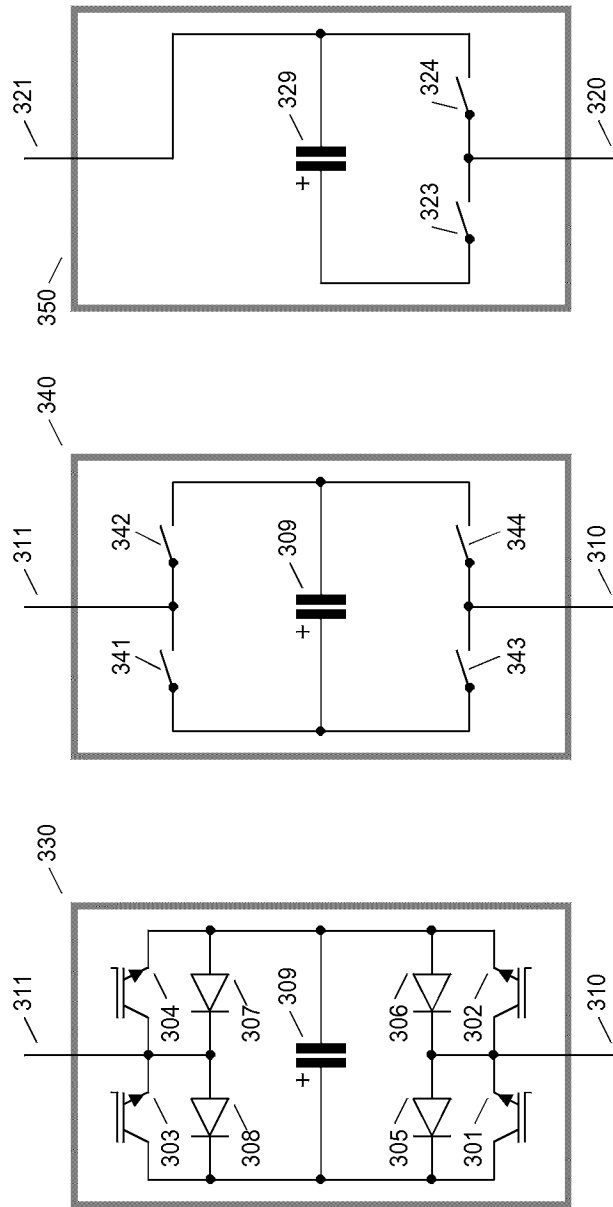


FIG. 3a

FIG. 3b

FIG. 3c

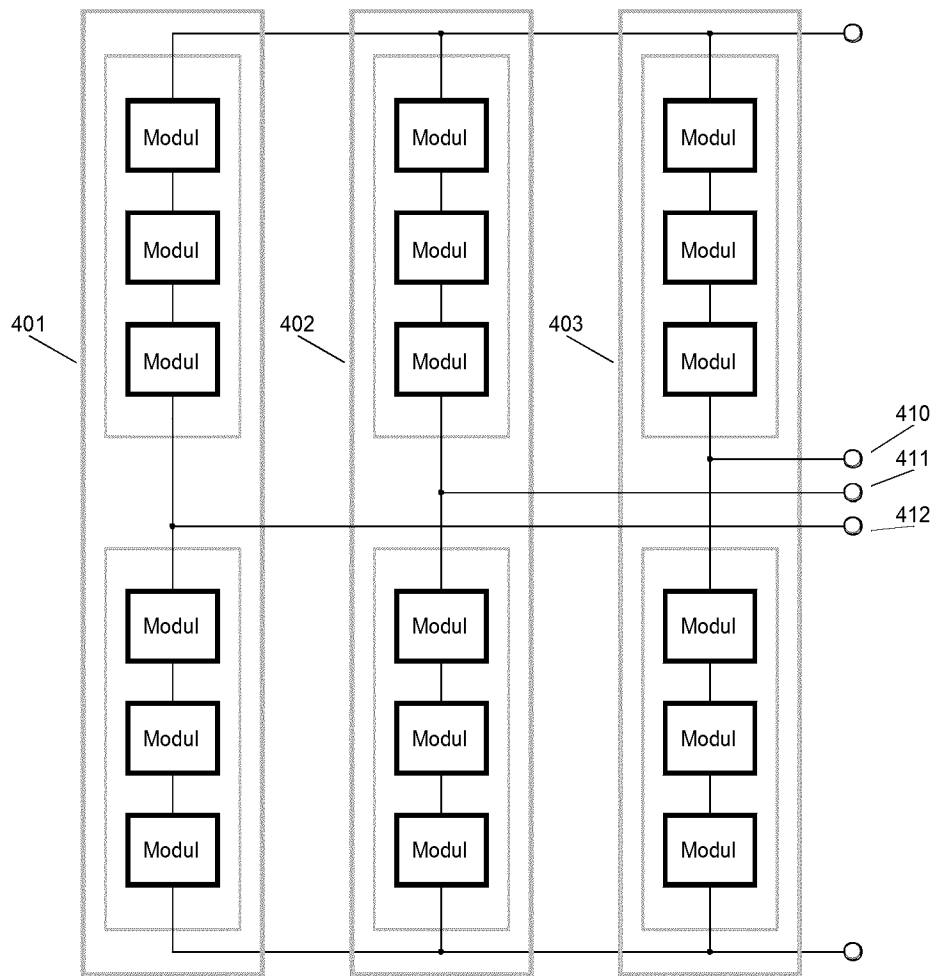


FIG. 4

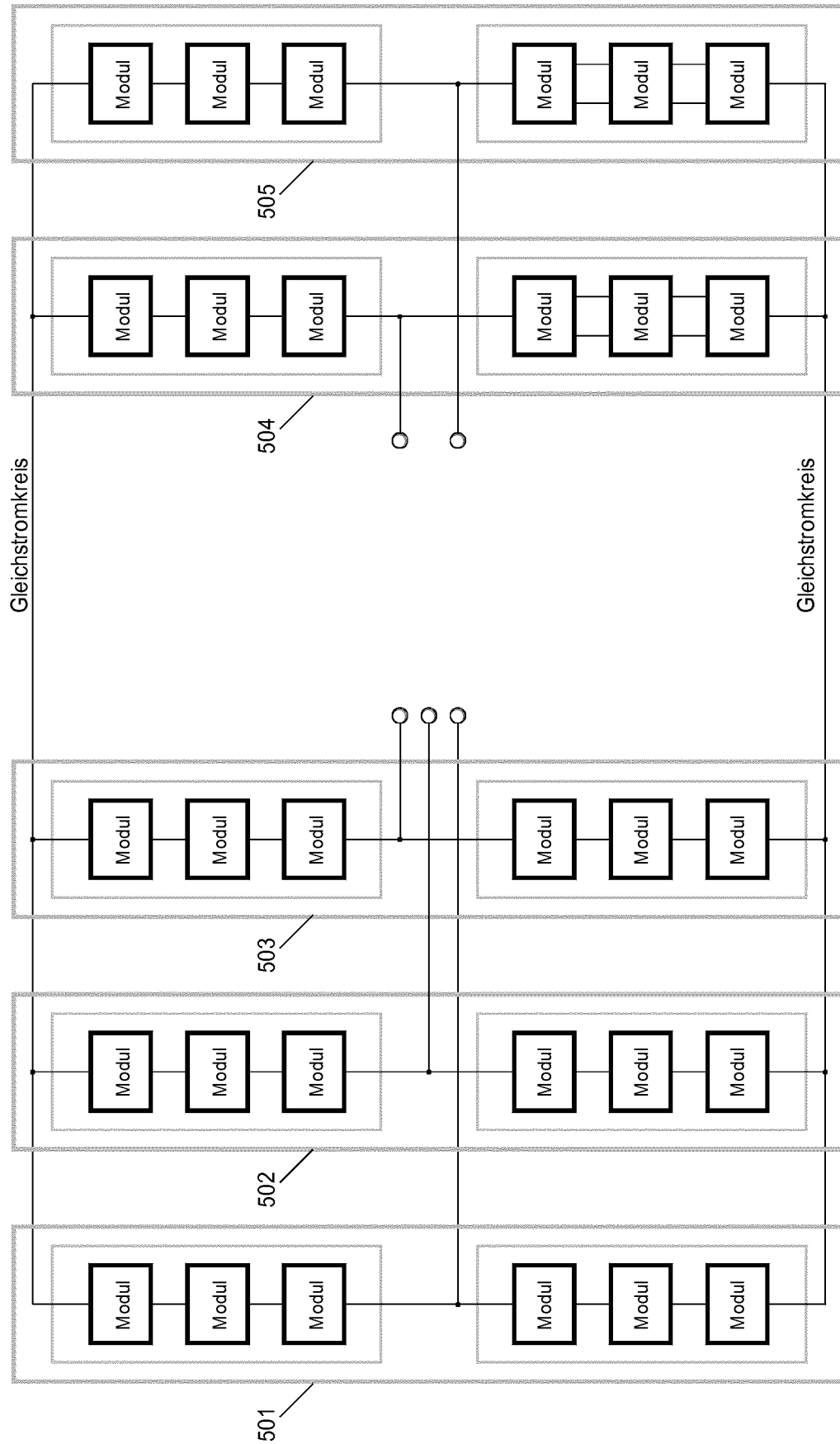


FIG. 5

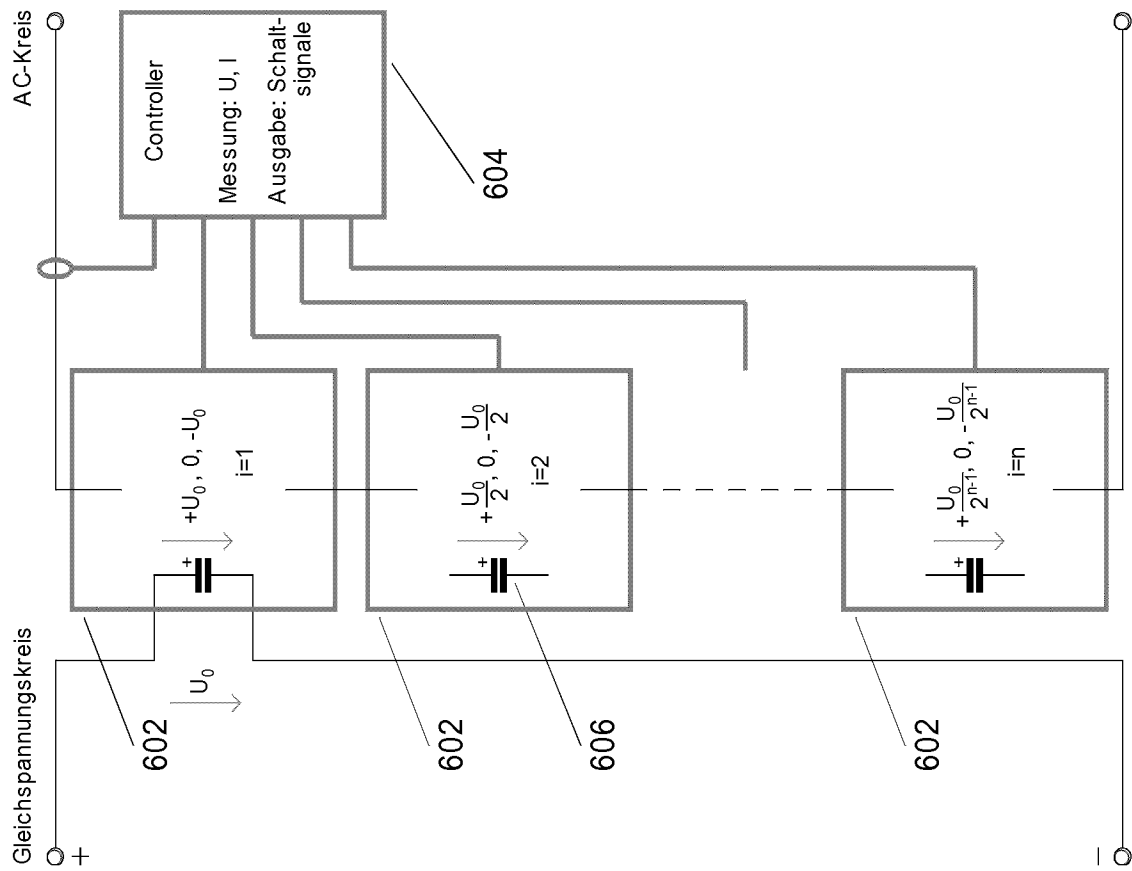


FIG. 6a

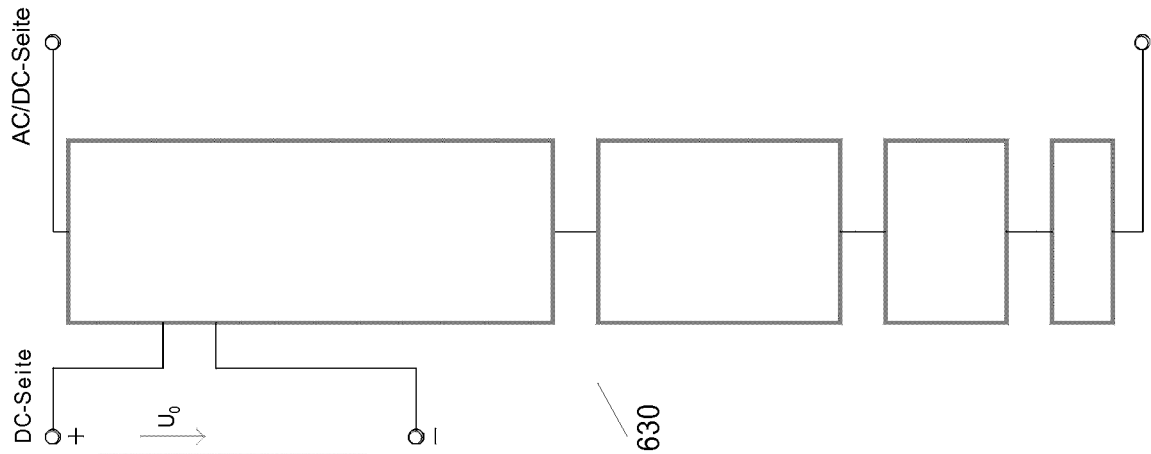


FIG. 6d

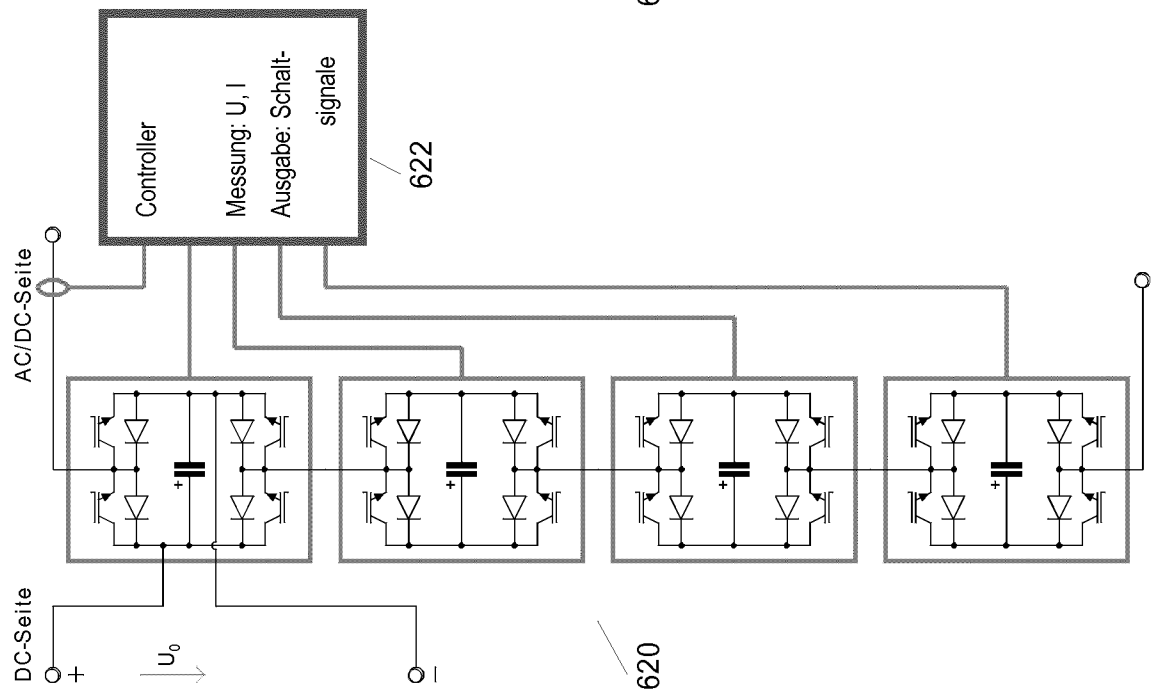


FIG. 6c

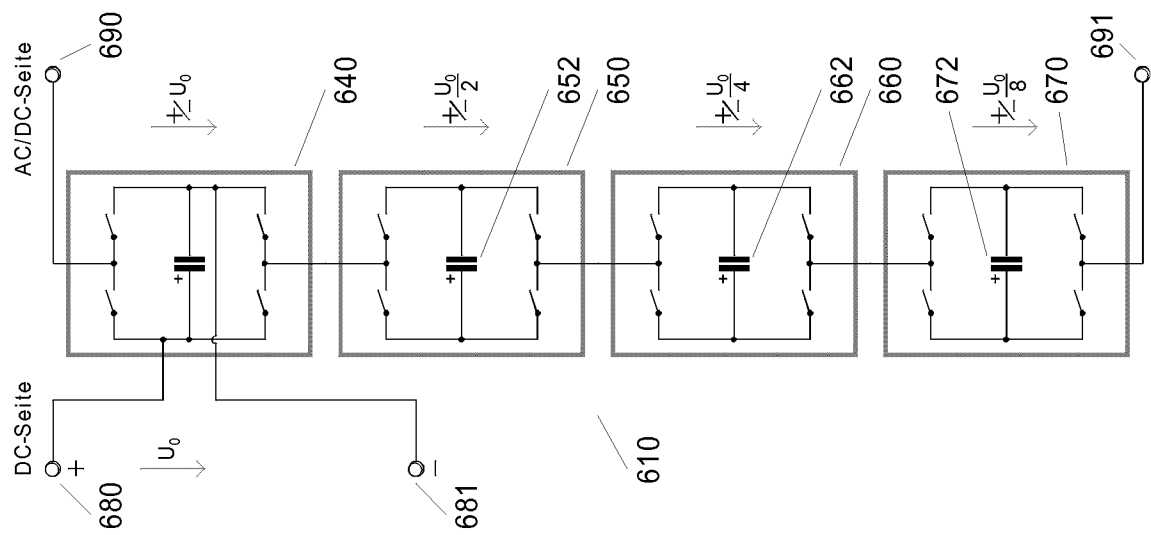


FIG. 6b

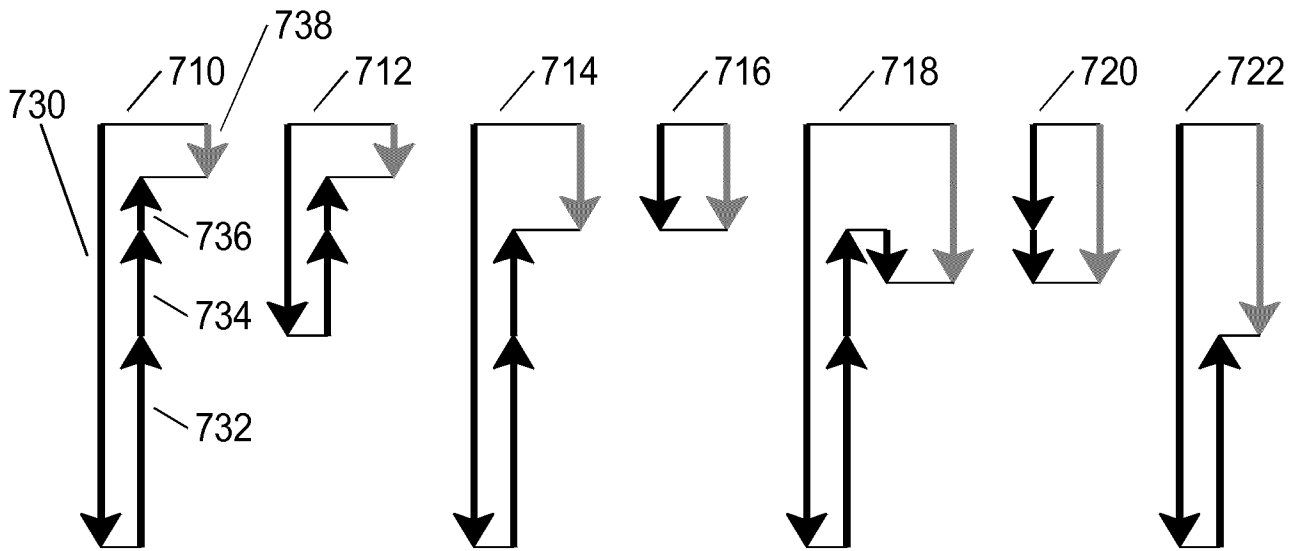


FIG. 7

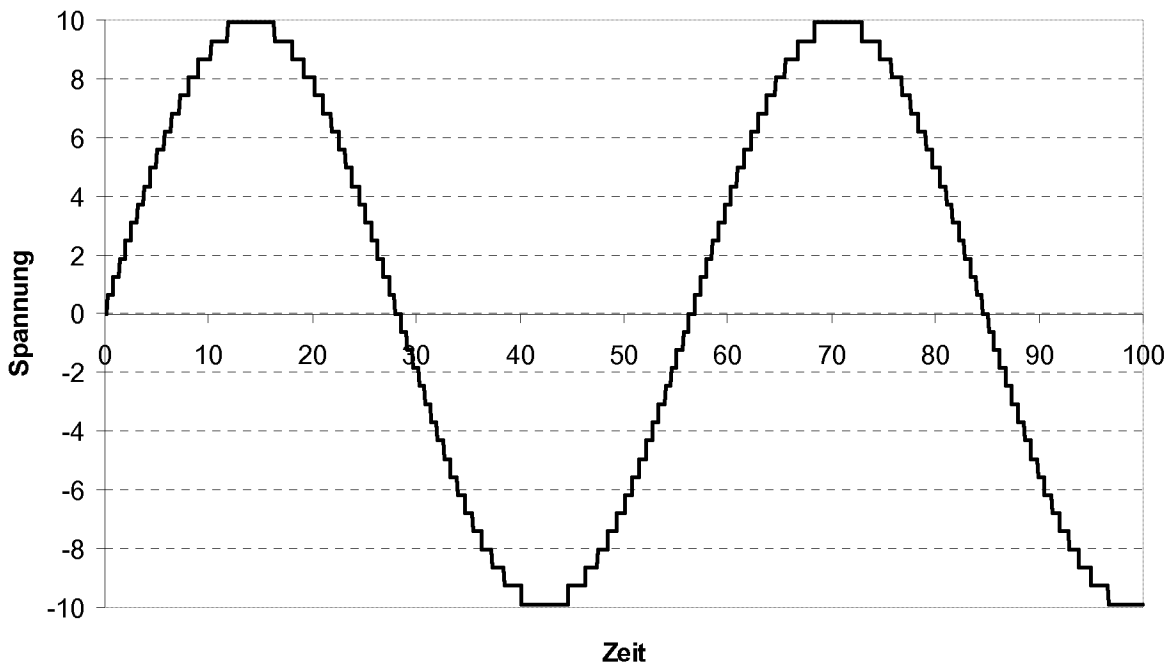


FIG. 8a

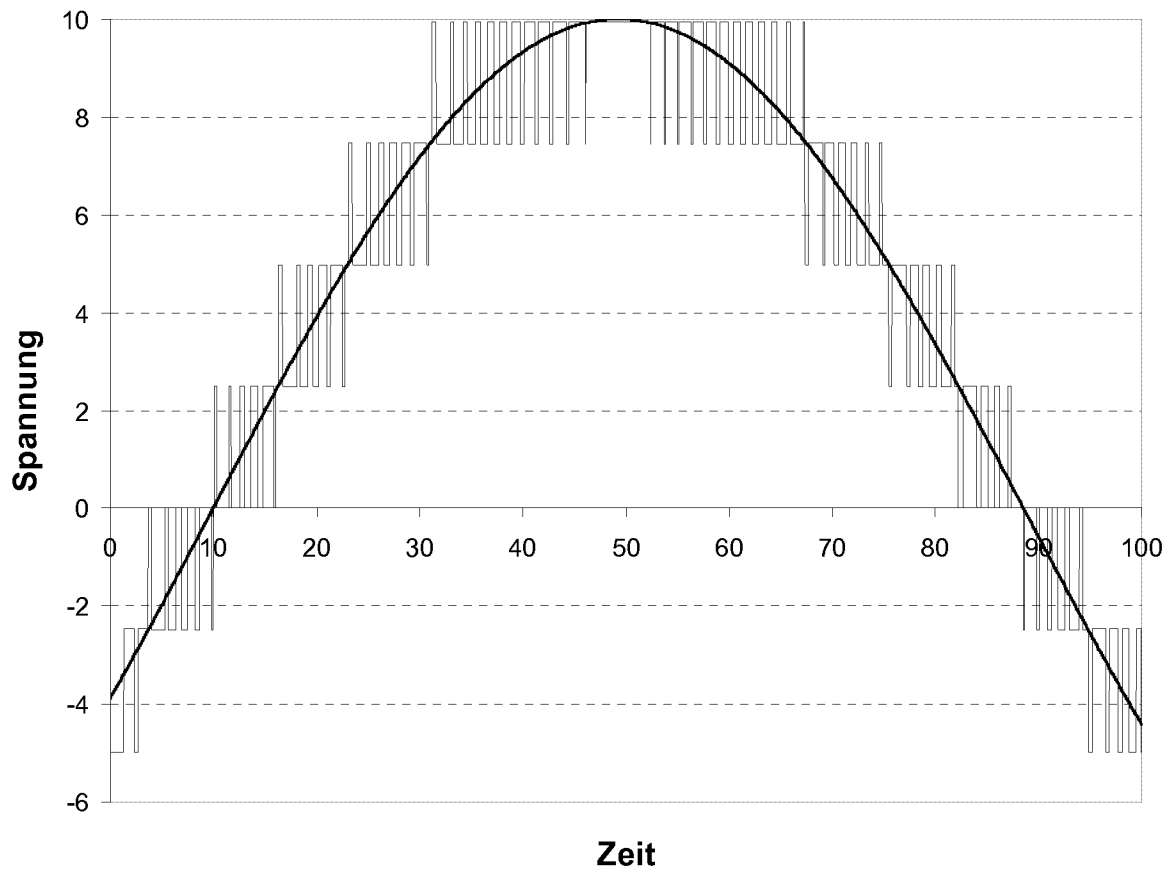


FIG. 8b

10/18

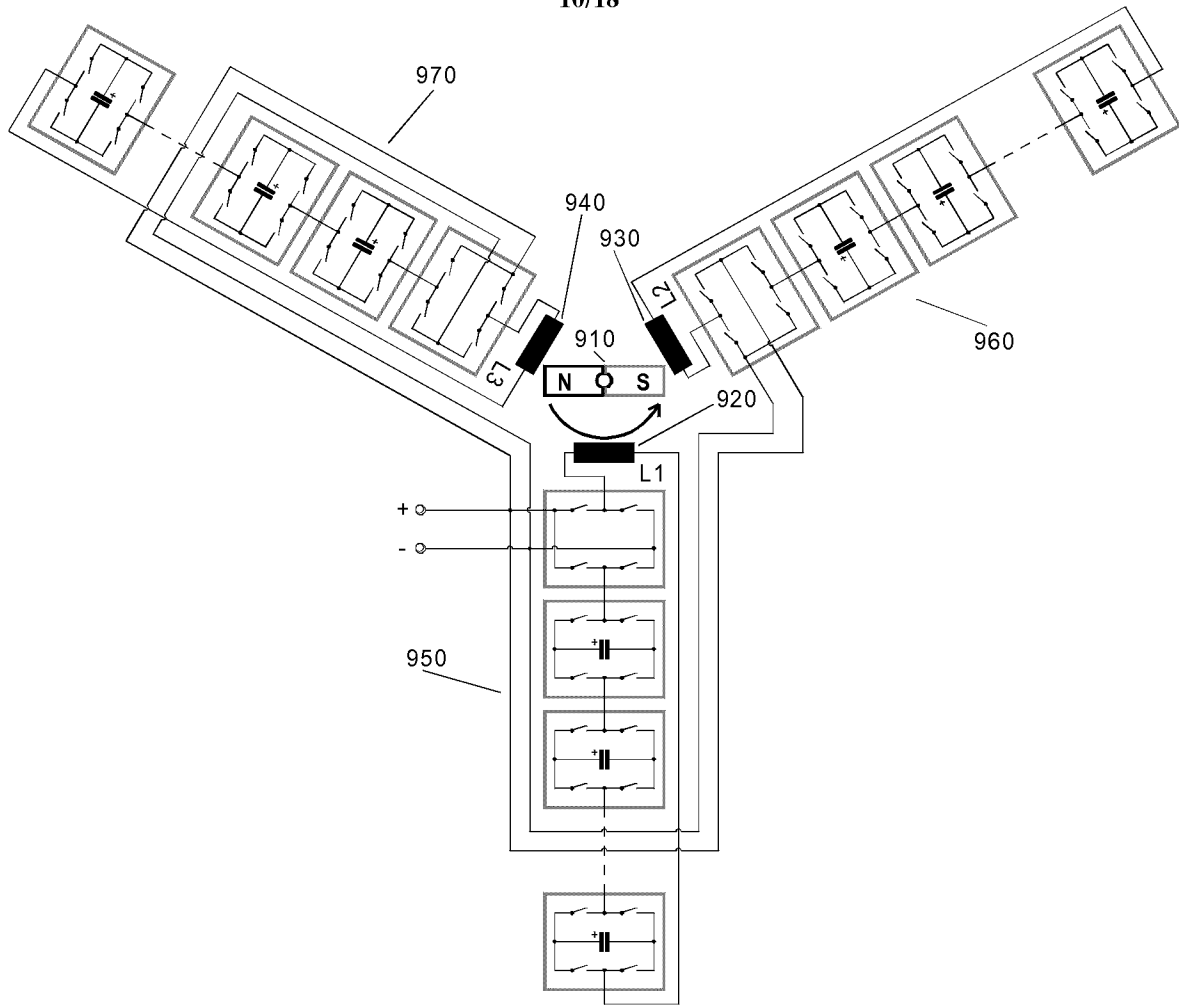


FIG. 9

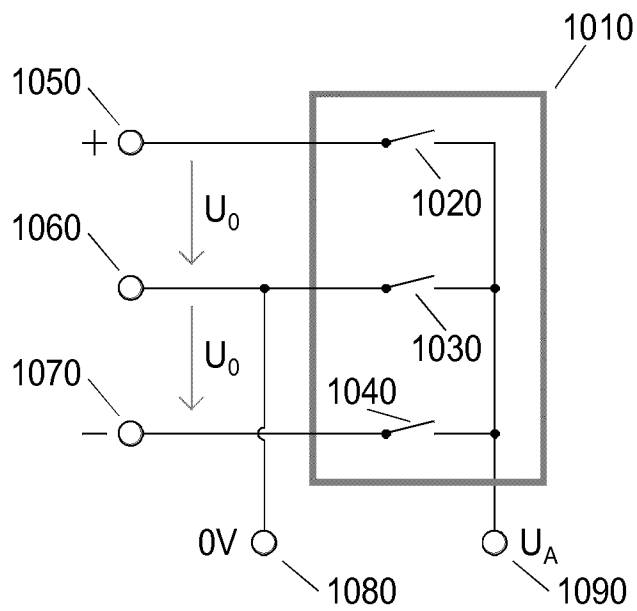


FIG. 10

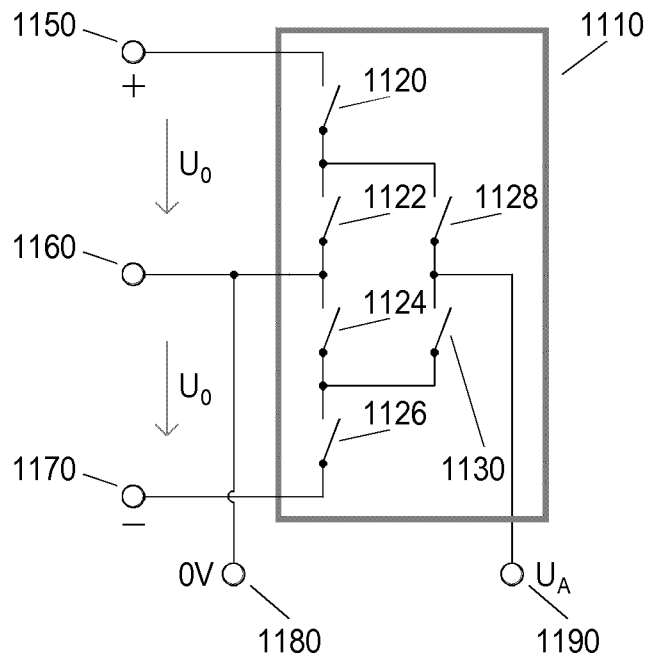


FIG. 11

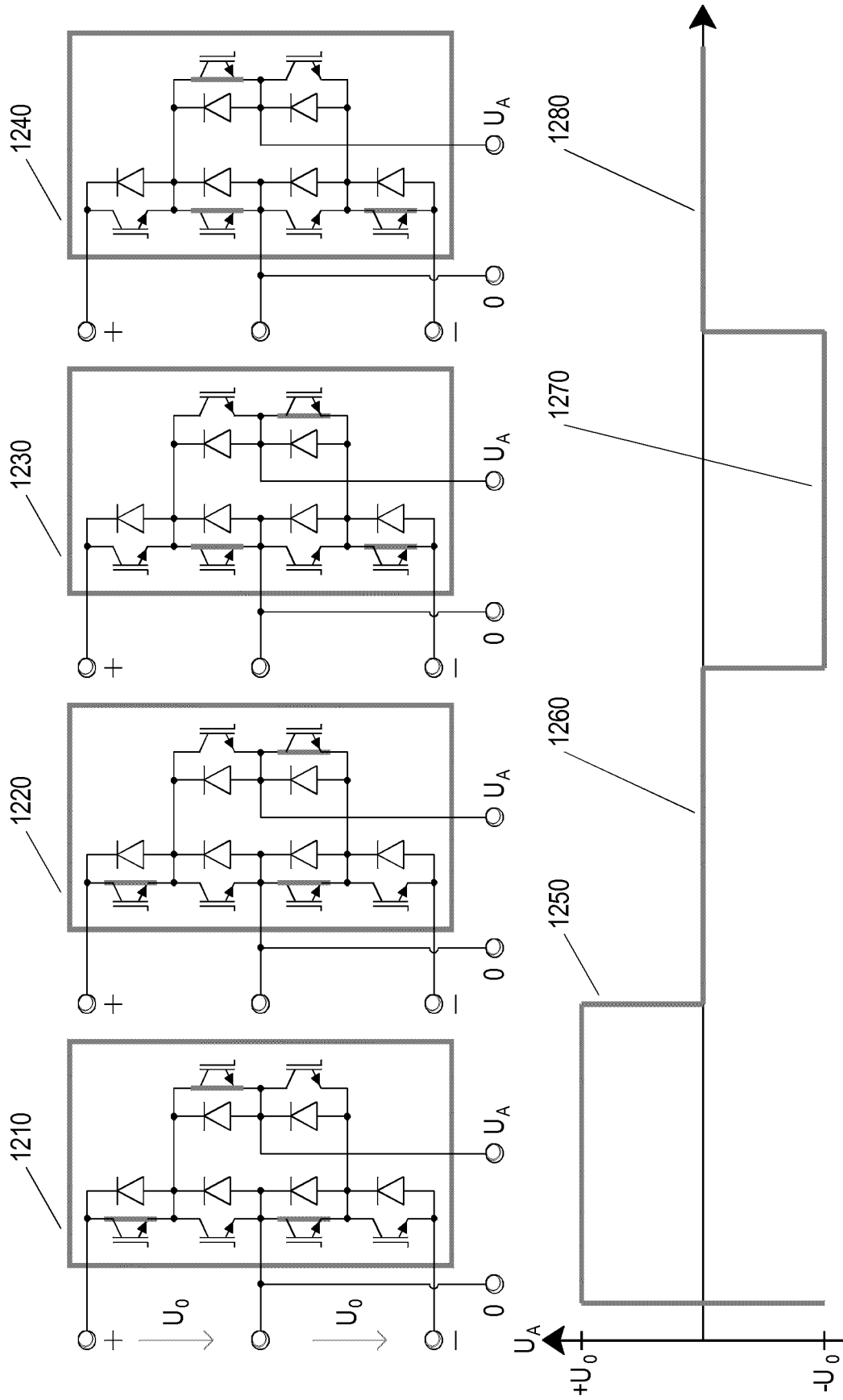


FIG. 12

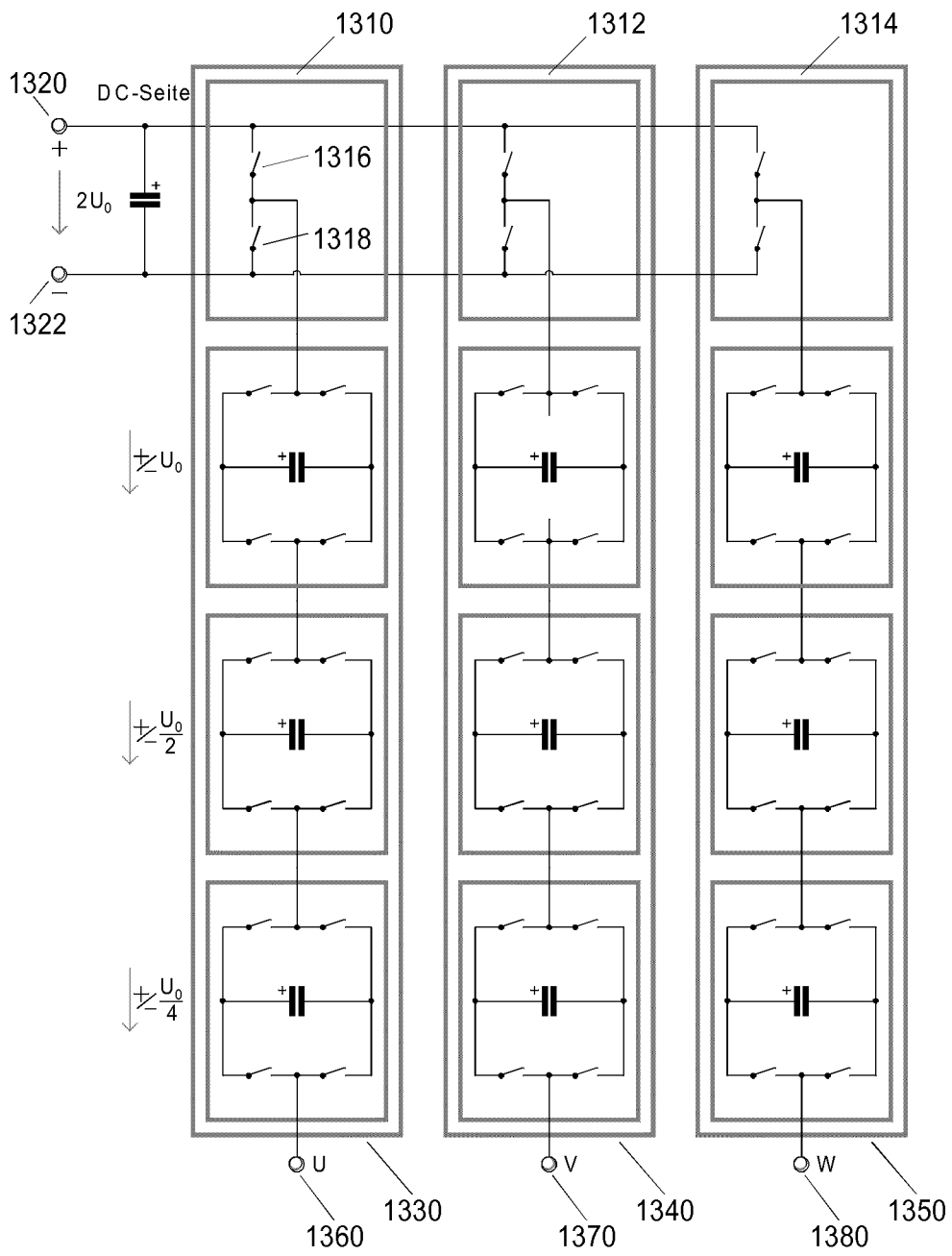
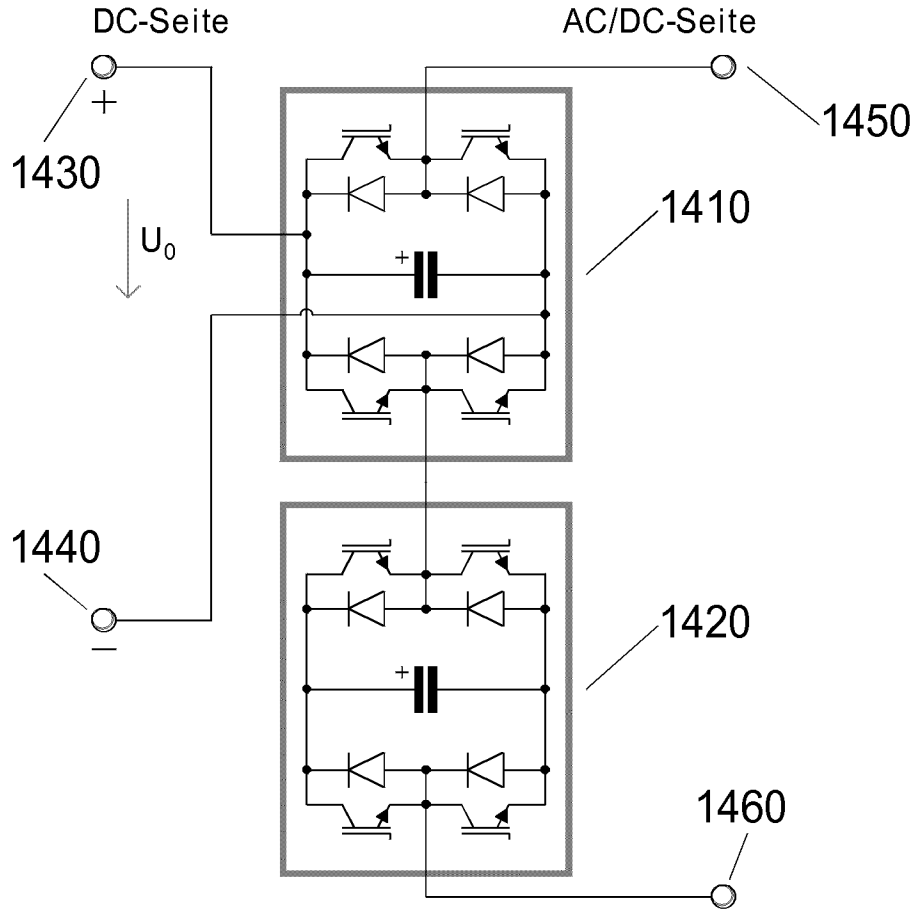


FIG. 13



Zustandsvektoren:

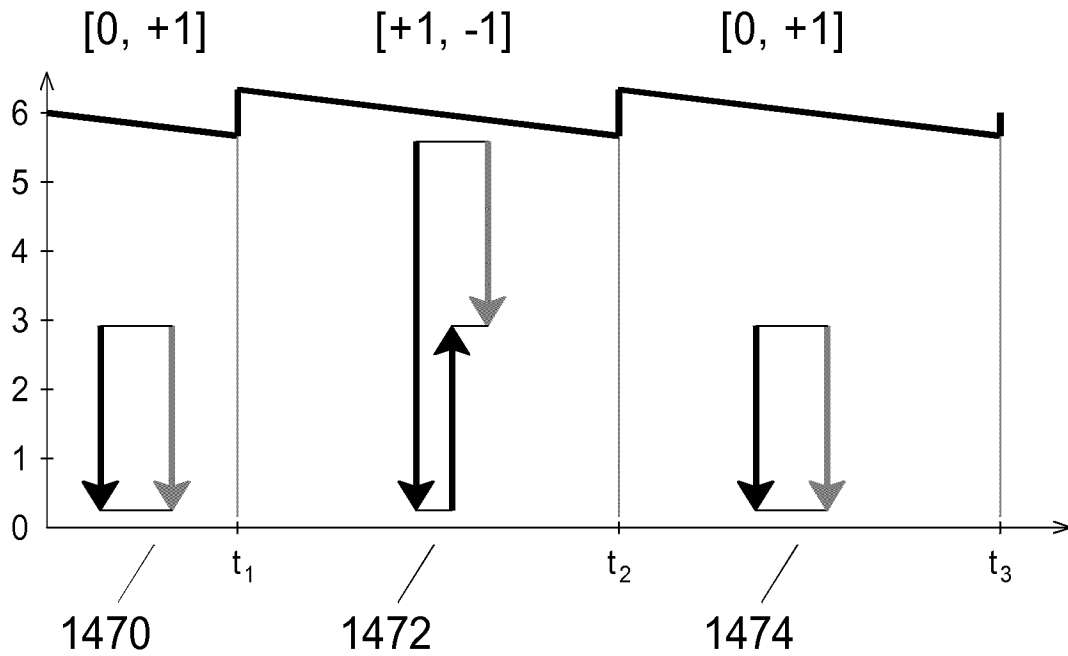
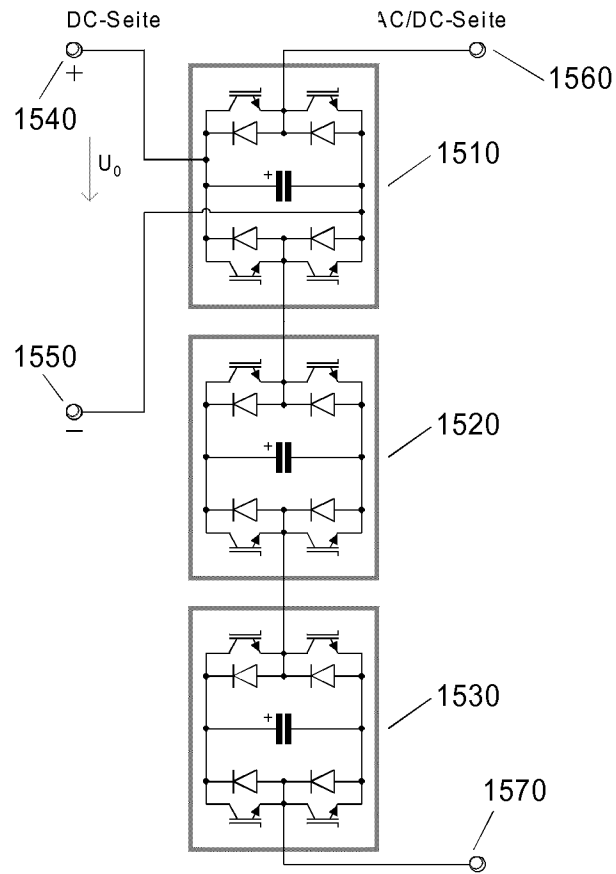


FIG. 14



Zustandsvektoren:

$[0, 0, +1]$   $[0, +1, -1]$   $[0, 0, +1]$   $[+1, -1, -1]$   $[0, 0, +1]$

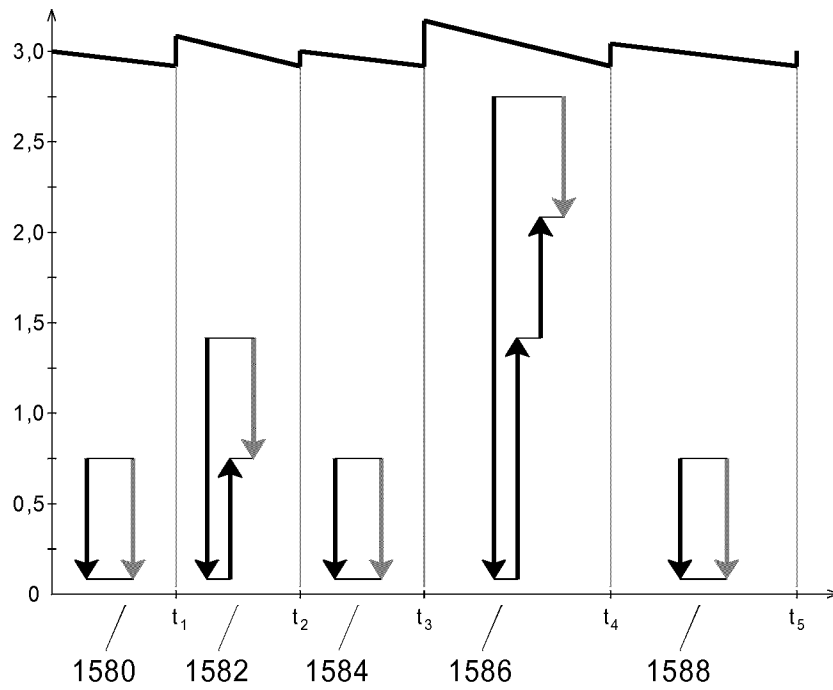


FIG. 15

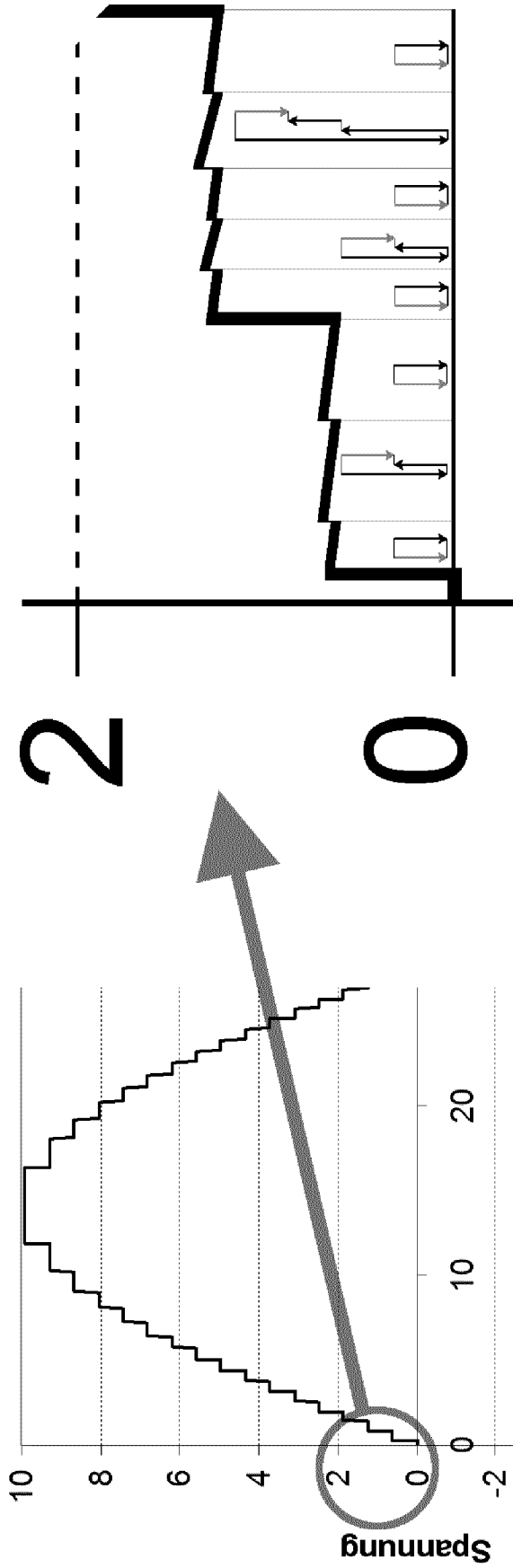


FIG. 16

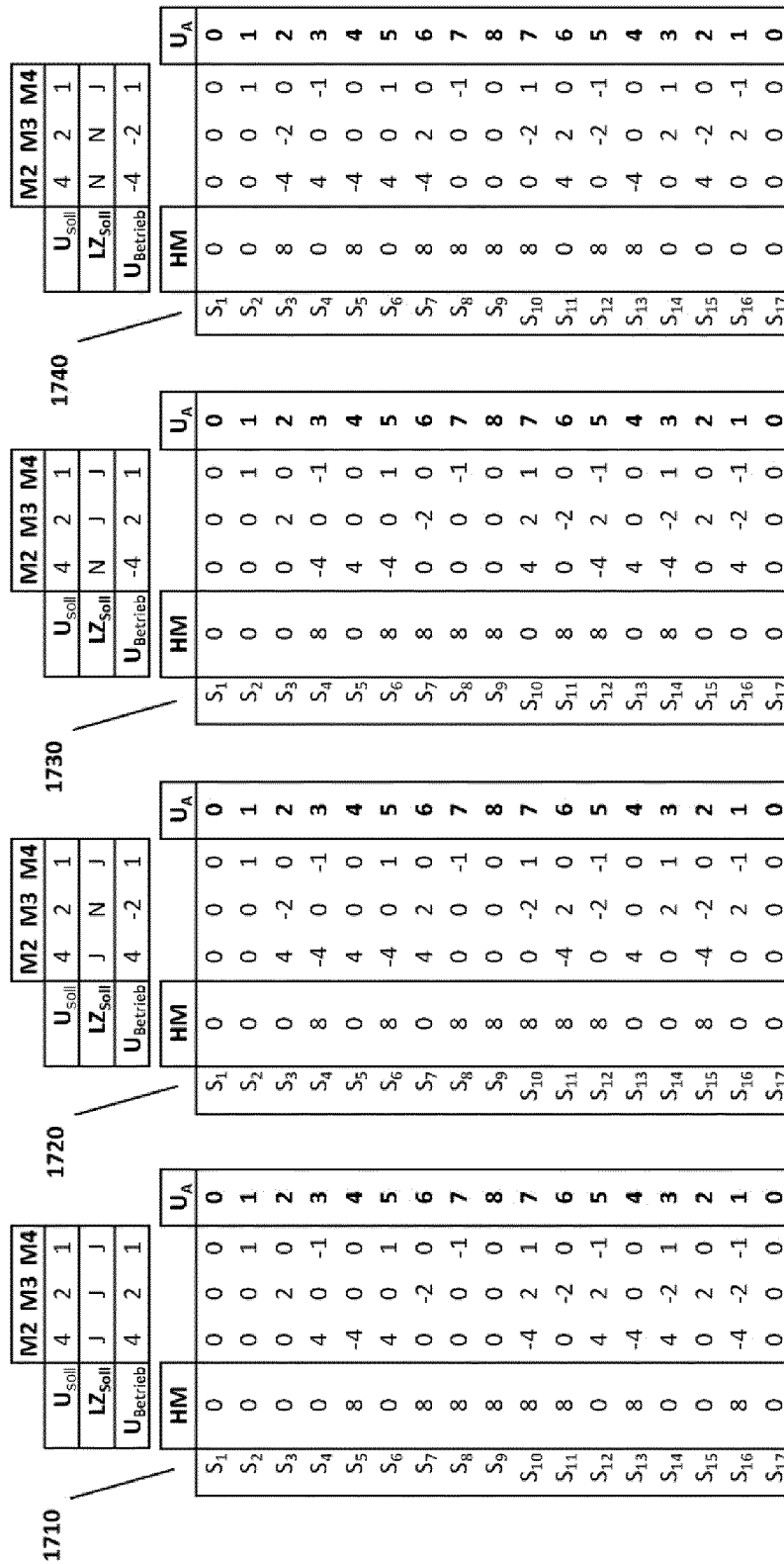


FIG. 17

1750		1760		1770		1780											
M2	M3	M4	M2	M3	M4	M2	M3	M4									
U <sub>soil</sub>	4	2	1	U <sub>soil</sub>	4	2	1	U <sub>soil</sub>	4	2	1						
LZ <sub>soil</sub>	J	J	N	LZ <sub>soil</sub>	J	N	N	LZ <sub>soil</sub>	N	N	N						
U <sub>Betrieb</sub>	4	2	-1	U <sub>Betrieb</sub>	4	-2	-1	U <sub>Betrieb</sub>	-4	-2	-1						
HM	HM		HM		HM		HM		HM		HM						
S <sub>1</sub>	0	0	0	S <sub>1</sub>	0	0	0	S <sub>1</sub>	0	0	0						
S <sub>2</sub>	0	0	2	-1	S <sub>2</sub>	0	4	-2	-1	S <sub>2</sub>	0	0					
S <sub>3</sub>	0	4	-2	0	S <sub>3</sub>	0	0	2	0	S <sub>3</sub>	0	0					
S <sub>4</sub>	0	0	2	1	S <sub>4</sub>	0	0	2	1	S <sub>4</sub>	0	0					
S <sub>5</sub>	8	0	0	0	S <sub>5</sub>	8	0	0	0	S <sub>5</sub>	8	0					
S <sub>6</sub>	8	0	-2	-1	S <sub>6</sub>	8	0	2	-1	S <sub>6</sub>	8	0					
S <sub>7</sub>	0	4	2	0	S <sub>7</sub>	8	0	-2	0	S <sub>7</sub>	8	0					
S <sub>8</sub>	8	0	-2	1	S <sub>8</sub>	8	0	4	2	1	S <sub>8</sub>	8	0				
S <sub>9</sub>	8	0	0	0	S <sub>9</sub>	8	0	0	0	S <sub>9</sub>	8	0					
S <sub>10</sub>	8	0	0	-1	S <sub>10</sub>	8	0	0	-1	S <sub>10</sub>	8	0					
S <sub>11</sub>	8	-4	2	0	S <sub>11</sub>	8	0	0	-1	S <sub>11</sub>	8	0					
S <sub>12</sub>	0	4	0	1	S <sub>12</sub>	8	0	-2	0	S <sub>12</sub>	8	0					
S <sub>13</sub>	8	-4	0	0	S <sub>13</sub>	8	-4	0	1	S <sub>13</sub>	8	0					
S <sub>14</sub>	0	4	0	-1	S <sub>14</sub>	8	0	4	0	0	S <sub>14</sub>	8	-4				
S <sub>15</sub>	8	-4	-2	0	S <sub>15</sub>	0	0	2	0	S <sub>15</sub>	0	0					
S <sub>16</sub>	0	0	0	1	S <sub>16</sub>	0	0	0	1	S <sub>16</sub>	0	0					
S <sub>17</sub>	0	0	0	0	S <sub>17</sub>	0	0	0	0	S <sub>17</sub>	0	0					
U <sub>A</sub>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1	0

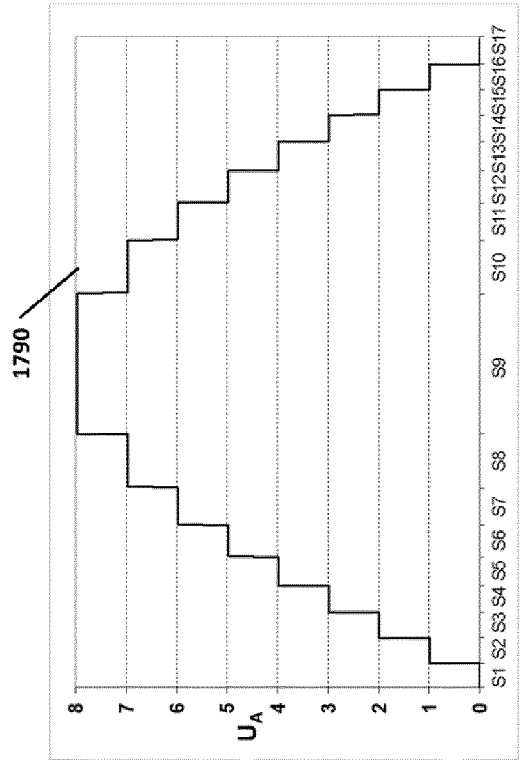


FIG. 17 (Cont.)

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/EP2018/059572

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
INV. H02M7/483  
ADD.  
  
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**  
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
H02M

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2007/028350 A1 (SIEMENS AKITENGESELLSCHAFT [DE]; DAVIES MARK [DE]; DORN JOERG [DE]; HU) 15 March 2007 (2007-03-15) page 5, lines 12-20 page 21, line 30 - page 22, line 8 -----	1-51
A	US 6 005 788 A (LIPO THOMAS A [US] ET AL) 21 December 1999 (1999-12-21) figure 5 -----	1-51
A	WO 2013/075928 A1 (SIEMENS AG [DE]) 30 May 2013 (2013-05-30) page 8, lines 22-27 page 12, line 25 - page 13, line 10 -----	1-51

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search  25 June 2018	Date of mailing of the international search report  04/07/2018
---	--

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

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2018/059572

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2007028350	A1	15-03-2007	CA 2622089 A1 15-03-2007
			DE 112005003749 A5 14-08-2008
			EP 1922804 A1 21-05-2008
			JP 2009507463 A 19-02-2009
			US 2008252142 A1 16-10-2008
			WO 2007028350 A1 15-03-2007
-----			
US 6005788	A	21-12-1999	AU 2765599 A 30-08-1999
			US 6005788 A 21-12-1999
			WO 9941828 A1 19-08-1999
-----			
WO 2013075928	A1	30-05-2013	EP 2759050 A1 30-07-2014
			WO 2013075928 A1 30-05-2013
-----			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. H02M7/483  
 ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )  
 H02M

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

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 2007/028350 A1 (SIEMENS AKITENGESELLSCHAFT [DE]; DAVIES MARK [DE]; DORN JOERG [DE]; HU) 15. März 2007 (2007-03-15) Seite 5, Zeilen 12-20 Seite 21, Zeile 30 - Seite 22, Zeile 8 -----	1-51
A	US 6 005 788 A (LIPO THOMAS A [US] ET AL) 21. Dezember 1999 (1999-12-21) Abbildung 5 -----	1-51
A	WO 2013/075928 A1 (SIEMENS AG [DE]) 30. Mai 2013 (2013-05-30) Seite 8, Zeilen 22-27 Seite 12, Zeile 25 - Seite 13, Zeile 10 -----	1-51



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

25. Juni 2018

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

04/07/2018

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Gotzig, Bernhard

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/059572

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2007028350	A1	15-03-2007	CA 2622089 A1
			DE 112005003749 A5
			EP 1922804 A1
			JP 2009507463 A
			US 2008252142 A1
			WO 2007028350 A1
-----			
US 6005788	A	21-12-1999	AU 2765599 A
			US 6005788 A
			WO 9941828 A1
-----			
WO 2013075928	A1	30-05-2013	EP 2759050 A1
			WO 2013075928 A1
-----			