

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: 85108921.9

51 Int. Cl.⁴: G 05 F 1/30

22 Anmeldetag: 16.07.85

30 Priorität: 24.07.84 DE 3427291
29.01.85 DE 3502889
27.03.85 DE 3511182

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:
29.01.86 Patentblatt 86/5

84 Benannte Vertragsstaaten:
AT CH DE FR GB IT LI NL SE

71 Anmelder: MITEC Moderne Industrietechnik GmbH
Daimlerstrasse 15
D-8012 Ottobrunn(DE)

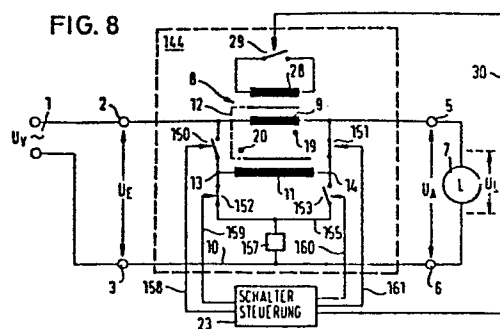
72 Erfinder: Mehnert, Walter, Dr. Dipl.-Ing.
Grillparzerstrasse 6
D-8012 Ottobrunn(DE)

72 Erfinder: Bölkow, Ludwig, Dr. Dipl.-Ing.
Oberfeldallee 9
D-8022 Grünwald(DE)

74 Vertreter: Strasser, Wolfgang, Dipl.-Phys et al,
Patentanwälte Strohschänk, Uri & Strasser Innere
Wiener Strasse 8
D-8000 München 80(DE)

54 Transformatorschaltung.

57 Zur Verringerung von Verlustleistung, Gewicht und Schaltzeiten umfaßt eine Transformatorschaltung wenigstens eine Stelleinheit (144), bei der die erste Wicklung (9) eines Transformators (8) einen Eingangsanschluß (2) mit einem Ausgangsanschluß (5) verbindet. Durch Schalter (150 bis 153) ist an eine weitere Wicklung (11) des Transformators entweder die Eingangsspannung oder die Ausgangsspannung der Stelleinheit anlegbar, wodurch auf die Eingangsspannung eine in der ersten Wicklung induzierte Spannung (ΔU) additiv oder subtraktiv aufgeprägt wird. Die weitere Wicklung kann mit antiparallelem Wicklungssinn zur ersten Wicklung parallelgeschaltet oder kurzgeschlossen werden, wodurch die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung wird. Wird der Kreis der weiteren Wicklung geöffnet, drosselt die erste Wicklung den Laststrom. Für ein schnelles Umschalten werden kurzzeitig alle Schalter gleichzeitig geschlossen, wobei eine Strombegrenzungsschaltung (157) den Kurzschlußstrom begrenzt. V-MOS-Transistoren als Schalter verkürzen die Umschaltzeiten weiter. Zwei oder mehr Stelleinheiten können in Reihe geschaltet werden und dienen mit einer Meßfühleranordnung, einer Komparatoranordnung und einer Schaltersteuerung als Spannungskonstanter oder Spannungsregler.



Transformatorschaltung

Die Erfindung betrifft eine Transformatorschaltung gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

Solche Transformatorschaltungen dienen dazu, mit Hilfe wenigstens einer Stelleinheit, die in verschiedene Schaltzustände bringbar ist, die Amplitude einer von einer Spannungsquelle abgegebenen Versorgungs-Wechselspannung erforderlichenfalls zu verändern, bevor sie als Last-Wechselspannung an einen Verbraucher angelegt wird.

Eine derartige Transformatorschaltung ist beispielsweise aus der DE-OS 25 00 065 bekannt. Diese Schaltung umfaßt eine einzige Stelleinheit mit einem Transformator, dessen Primärwicklung von der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung gespeist wird. An der Sekundärwicklung sind mehrere Abgriffe vorgesehen, die mit Hilfe von selbsttätig steuerbaren Schaltern wahlweise mit den zur Last führenden Leitungen verbunden werden können. Hierdurch wird sichergestellt, daß der Last auch dann immer die gleiche Wechselspannungsamplitude zugeführt wird, wenn die Schaltung an Spannungsquellen angeschlossen wird, die hinsichtlich der Amplitude unterschiedliche Wechselspannungen abgeben.

Diese bekannte Anordnung weist jedoch eine Reihe von Nachteilen auf. So muß die gesamte der Last zugeführte Leistung über das Magnetfeld des Transformators weitergegeben werden. Die Dimensionierung des Transformators muß daher an diese Gesamtleistung angepaßt werden und es

ergeben sich entsprechend hohe Verluste. Nimmt die Last sehr hohe Leistungen auf, so muß also der Transformator sehr groß ausgelegt und überdies gekühlt werden, was zu erheblichen Herstellungs- und Betriebskosten führt. Darüber hinaus ist die bekannte Schaltung nicht geeignet, häufig und schnell umzuschalten, um trotz entsprechender Änderungen der Amplitude der Versorgungsspannung die Lastspannung zumindest annähernd konstant zu halten. Würde man die bekannte Anordnung in dieser Weise betreiben, so würden sich erhebliche Probleme auch aus der Tatsache ergeben, daß die gesamte der Last zugeführte Leistung über die Umschalter fließt. Diese Schalter müßten einerseits unter Last betätigt werden und es müßten andererseits besondere Maßnahmen ergriffen werden, um zu verhindern, daß es während des Umschaltens zu Unterbrechungen der Energiezufuhr zur Last kommt.

Demgegenüber liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Transformatorschaltung der eingangs genannten Art zu schaffen, mit deren Hilfe die Amplitude der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung auf einfache und schnelle Weise und unter außerordentlich geringen Energieverlusten verändert werden kann.

Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung die im Anspruch 1 niedergelegten Merkmale vor.

Diesen Maßnahmen liegt die Überlegung zugrunde, daß in vielen Anwendungsfällen die erforderliche Änderung der Amplitude der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung nur einen vergleichsweise kleinen Prozentsatz, beispielsweise von $\pm 25\%$ der Amplitude ausmacht. Daher wird erfindungsgemäß der Hauptteil der Leistung der Last über die erste Wicklung des Transformators auf galvanischem Wege zugeführt, wobei wegen der geringen Windungszahl dieser Wicklung und der

niederen Frequenzen, mit denen hohe Leistungen an Lasten abgegeben werden, die Induktivität dieser ersten Wicklung nur einen sehr geringen Spannungsabfall mit entsprechend kleinen Verlusten erzeugt, die bei den herkömmlichen Transformatorschaltungen überdies in erhöhter Weise auftreten.

Gemäß der Erfindung kann die wenigstens eine Stelleinheit der Transformatorschaltung durch das Anlegen einer Steuerungspannung U_S an die weitere Wicklung in wenigstens einen Schaltzustand gebracht werden, in welchem in der ersten Wicklung des Transformators eine Spannung ΔU_1 induziert wird, die sich je nach dem Windungssinn der weiteren Wicklung bezüglich der ersten Wicklung zur Eingangsspannung addiert oder von dieser subtrahiert, so daß für die gegenüber der Eingangsspannung veränderte Ausgangsspannung U_A gilt:

$$U_A = U_E \pm \Delta U_1 \quad (1)$$

Dabei ist die relative Größe von ΔU_1 bezüglich der Steuerungspannung U_S durch das Windungsverhältnis w_1/w_w der ersten Wicklung des Transformators zur weiteren Wicklung gegeben:

$$\Delta U_1 = \frac{w_1}{w_w} \cdot U_S \quad (2)$$

Das Windungsverhältnis w_1/w_w ist hier wesentlich kleiner als 1 und liegt vorzugsweise im Bereich von 1:7 bis 1:200. Außerdem ist der Strom, der im ersten Schaltzustand durch die weitere Wicklung fließt, auf den Nenn-Laststrom, der durch die erste Wicklung des Transformators fließt, so abzustimmen, daß bei gegebenem Windungsverhältnis die Durchflutungen beider Wicklungen dem Betrag nach in etwa gleich groß sind und eine solche Winkelverschiebung gegeneinander aufwei-

sen, daß der Magnetfluß, der hierdurch im Transformator-kern resultiert, zum gewünschten induzierten additiven oder subtraktiven Spannungsabfall ΔU_1 an der ersten Wicklung des Transformators führt. Es zeigt sich, daß unter diesen Voraussetzungen der induzierte Spannungsabfall ΔU_1 vom Laststrom weitgehend unabhängig ist, so daß auch dann, wenn der Laststrom gegenüber seinem Nennwert schwankt, ein gleichbleibender Unterschied zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung der Stelleinheit aufrechterhalten werden kann.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Anordnung ist, daß über die magnetische Kopplung des Transformators lediglich der geringe Teil der Leistung geht, der für die induzierte Amplitudenänderung erforderlich ist. Damit werden die Energieverluste, die durch die induktive Energieübertragung von einer Transformatorwicklung auf die andere entstehen, in ganz erheblichem Ausmaß verringert. Somit kann der Transformator entsprechend kleiner dimensioniert und der für die Kühlung des Transformators erforderliche Aufwand reduziert werden. Auch über die Schalter, mit deren Hilfe an die weitere Wicklung des Transformators die Steuerspannung anlegbar ist, geht nur ein geringer Teil der Gesamtleistung, so daß die Schalter auch bei häufigen Schaltspielen weit weniger belastet werden. Überdies können auch bei sehr großen Lasten Halbleiterschalter, z.B. Triacs oder aus V-MOS-Transistoren aufgebaute Schalter verwendet werden, die ein erheblich schnelleres Schalten ermöglichen, als die in solchen Fällen nach dem Stand der Technik verwendeten mechanischen Schalter. Eine völlige Unterbrechung der Energiezufuhr zur Last beim Schalten kann grundsätzlich nicht auftreten, da die galvanische Verbindung zwischen Last und Spannungsquelle über die erste Wicklung des Transformators ständig aufrechterhalten bleibt.

Für eine universelle Verwendbarkeit einer solchen Stelleinheit ist es zweckmäßig, dafür zu sorgen, daß auch in den Zeiträumen, in denen sich die Stelleinheit nicht im ersten Schaltzustand befindet, die Magnetisierung des Transformator-kerns nicht im wesentlichen durch die Durchflutung der ersten Wicklung allein bewirkt wird. Dies kann z.B. durch eine Hilfswicklung erfolgen, die in den Zeiträumen, in denen die weitere Wicklung nicht an einer Steuerspannung liegt, mit Hilfe von Schaltern z.B. kurzgeschlossen wird. Durch entsprechende Dimensionierung der Windungszahl und des Stromes, der dann durch die Hilfswicklung fließt, kann die Durchflutung dieser Hilfswicklung so eingestellt werden, daß an der ersten Wicklung kein nennenswerter induzierter Spannungsabfall auftritt.

In den Zeiträumen, in denen die Hilfswicklung kurzgeschlossen ist, ist somit die Ausgangsspannung der Stelleinheit in etwa gleich der Eingangsspannung. Allerdings kann diese Gleichheit nur näherungsweise erreicht werden und der hierfür erforderliche apparative Aufwand ist vergleichsweise groß.

Vorzugsweise kann die wenigstens eine Stelleinheit der Transformatorschaltung jedoch durch das Anlegen verschiedener Steuerspannungen an eine oder mehrere weitere Wicklungen in verschiedene Schaltzustände gebracht werden, wie dies im folgenden für verschiedene Ausführungsformen erläutert wird:

- A) Stelleinheit mit einer einzigen weiteren Wicklung, an die zwei Steuerspannungen anlegbar sind.

Bezeichnet man den Schaltzustand, in dem sich eine solche Stelleinheit beim Anlegen der ersten Steuerspannung U_{S1} befindet, als ersten Schaltzustand, der durch die obigen

Gleichungen (1) und (2) beschrieben wird, so ergibt sich beim Anlegen der zweiten Steuerspannung U_{S2} an die weitere Wicklung unter den gleichen Voraussetzungen wie oben ein zweiter Schaltzustand, in welchem ein definierter, vom Laststrom weitgehend unabhängiger zweiter Spannungsabfall ΔU_2 an der ersten Wicklung induziert wird. In diesem Fall gilt für die Ausgangsspannung U_A :

$$U_A = U_E \pm \Delta U_2 \quad (3)$$

Dabei hängt ΔU_2 von der Steuerspannung U_{S2} ebenfalls gemäß der obigen Gleichung (2) ab.

Als Steuerspannungen finden vorzugsweise die Eingangsspannung U_E und die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit Verwendung, an die die weitere Wicklung unter Beachtung des Wicklungssinnes mit Hilfe der Schalter galvanisch unmittelbar so angeschlossen wird, daß sich die eine induzierte Spannung ΔU_1 zur Eingangsspannung addiert und sich die andere induzierte Spannung ΔU_2 von der Eingangsspannung U_E subtrahiert.

Somit gilt für die Ausgangsspannung U_A im ersten Schaltzustand

$$U_{A_1} = U_E + \Delta U_1 \quad (4)$$

und im zweiten Schaltzustand

$$U_{A_2} = U_E - \Delta U_2 \quad (5)$$

Allerdings können diese beiden induzierbaren Spannungen ΔU_1 und ΔU_2 nicht voneinander unabhängig gewählt werden. Sie sind vielmehr gemäß den Gleichungen

$$\Delta U_1 = \frac{w_1}{w} \cdot U_E \quad (6)$$

und

$$-\Delta U_2 = \frac{w_1}{w_1 + w_w} \cdot U_E \quad (7)$$

miteinander verknüpft, wenn w_1 die Windungszahl der ersten Wicklung und w_w die Windungszahl der weiteren Wicklung des Transformators ist.

Damit auch eine unveränderte Weitergabe der Amplitude der Eingangsspannung der Stelleinheit an die Ausgangsanschlüsse der Stelleinheit möglich ist, kann die Stelleinheit weiterhin in einen dritten Schaltzustand gebracht werden, in welchem in der ersten Wicklung des Transformators keine Spannung induziert wird. Damit die erste Wicklung in diesem dritten Schaltzustand keine Drosselwirkung mit einem entsprechend hohen Spannungsabfall entfaltet, muß dabei dafür Sorge getragen werden, daß die Magnetisierung des Transformator-kerns nicht im wesentlichen durch die Durchflutung der ersten Wicklung allein bewirkt wird. Dies kann auf verschiedene Weise geschehen, wie im folgenden genauer erläutert wird. Wesentlich ist, daß in diesem dritten Schaltzustand an der ersten Wicklung des Transformators nur eine äußerst geringe Spannung abfällt, so daß mit guter Näherung die Ausgangsspannung der Stelleinheit gleich der Eingangsspannung ist:

$$U_{A_3} = U_E \quad (8)$$

Wegen des kleinen Spannungsabfalls an der ersten Wicklung wird auch in der weiteren Wicklung nur eine kleine Spannung induziert, so daß der im Stromkreis der weiteren Wicklung fließende Kurzschlußstrom klein bleibt und nur sehr geringe Leistungsverluste verursacht.

Eine erste Möglichkeit zur Realisierung des dritten Schaltzustandes besteht darin, daß man einen Schalter vorsieht, mit dessen Hilfe die eine weitere Wicklung

kurzgeschlossen werden kann, wobei sie gleichzeitig von allen Steuerspannungen getrennt wird.

Um den Transformator nicht zu überlasten, muß dabei sichergestellt werden, daß der Kurzschlußschalter nur geschlossen wird, wenn die zum Anlegen der Steuerspannungen dienenden Schalter geöffnet sind. Auch muß dafür gesorgt werden, daß die zum Anlegen der einen Steuerspannung dienenden Schalter nur dann geschlossen werden, wenn die Schalter geöffnet sind, die zum Anlegen der anderen Steuerspannung dienen, und umgekehrt.

Um ein gleichzeitiges Schließen dieser Schalter unmöglich zu machen, wird der Schaltzustand eines jeden Schalters mit Hilfe einer zugehörigen Sensoreinheit überwacht und ein Schließbefehl für einen bisher offenen Schalter durch eine Sperrschaltung unterdrückt, wenn das Ausgangssignal der Sensoreinheit der anderen Schalter anzeigt, daß einer dieser anderen Schalter noch geschlossen ist.

Es ist wünschenswert, daß beim Umschalten von einem Schaltzustand in den anderen die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit möglichst schnell und möglichst "glatt", d.h. ohne starke Schwankungen des Amplituden-Absolutbetrages der Ausgangswechselspannung nach oben oder nach unten von ihrem alten zum neuen Amplitudenwert übergeht. Dies kann jedoch bei der Ausführungsform, bei der der dritte Schaltzustand durch Kurzschließen der weiteren Wicklung hergestellt wird, nicht in optimaler Weise erreicht werden, da für das Schließen und Öffnen der Schalter bestimmte Schaltkriterien beachtet werden müssen, die es unmöglich machen, von einem Amplitudenwert der Ausgangsspannung auf einen anderen so schnell umzuschalten, daß nach weniger als einer vollen Schwingungsperiode der Last-Wechselspannung der Amplitudenwert stabil erreicht ist.

Daher ist vorzugsweise vorgesehen, den dritten Schaltzustand dadurch herzustellen, daß die weitere Wicklung des Transformators zur ersten Wicklung elektrisch so parallelgeschaltet wird, daß man einen kurzgeschlossenen Transformator mit zwei auf seinen Kern antiparallel gewickelten Wicklungen erhält, die an der gleichen Spannung liegen. Die Ströme, die dabei in den beiden antiparallelen Wicklungen fließen, versuchen jeweils im Kern des Transformators ein Magnetfeld aufzubauen; diese Felder sind jedoch einander entgegengerichtet und heben sich im wesentlichen gegenseitig auf. Die Streuinduktivität und der ohm'sche Widerstand der vom Laststrom durchflossenen ersten Wicklung sind sehr klein. Damit ist der an ihr auftretende Spannungsabfall sehr klein und es gilt mit guter Näherung die obige Gleichung (8). Entsprechend klein ist auch der durch die weitere Wicklung fließende Strom, da die weitere Wicklung einen wesentlich größeren Scheinwiderstand besitzt als die erste Wicklung des Transformators. Hierdurch fließt der Laststrom also praktisch ausschließlich durch diese erste Wicklung.

Prinzipiell genügen bei einem Transformator, der nur eine einzige weitere Wicklung besitzt, vier Schalter, um die betreffende Stelleinheit in die genannten drei verschiedenen Schaltzustände bringen zu können.

Werden keine weiteren Maßnahmen getroffen, so muß auch in diesem Fall sorgfältig darauf geachtet werden, daß nicht durch gleichzeitiges Schließen entsprechender Schalter die Eingangsspannung und/oder die Ausgangsspannung der Stelleinheit kurzgeschlossen wird, wodurch ein unzulässig hoher Kurzschlußstrom fließen würde. Dies würde allerdings bedeuten, daß auch hier wieder für das Öffnen und Schließen der Schalter bestimmte Schaltkriterien beachtet werden müßten, die beim Übergang von einem Schaltzustand in einen anderen das Erreichen

des neuen Amplitudenwertes verzögern würden.

Um dies zu vermeiden, ist bei besonders bevorzugten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Stelleinheit die Verwendung einer oder mehrerer Strombegrenzungsschaltungen vorgesehen.

Bei einem Transformator, der nur eine einzige weitere Wicklung umfaßt, können der dritte und vierte Schalter, d.h. die beiden Schalter, mit denen die beiden Enden der weiteren Wicklung mit dem Anschluß-Verbindungsleiter der Stelleinheit verbindbar sind, beispielsweise selbst jeweils als Strombegrenzungsschaltung in der Weise ausgebildet sein, daß sie im geöffneten Zustand überhaupt keinen Strom durchlassen und im geschlossenen Zustand dem sie durchfließenden Strom nur solange einen sehr kleinen, konstanten Widerstand entgegensetzten, solange dieser Strom unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes bleibt, ein Ansteigen des Stromes über diesen Grenzwert hinaus aber verhindern.

Der Übergang vom ersten in den zweiten Schaltzustand oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand erfolgt dann einfach in der Weise, daß zunächst auch die beiden im bisherigen Schaltzustand geöffneten Schalter geschlossen werden, was einem Übergang in den dritten Schaltzustand entspricht, und daß erst danach die Schalter geöffnet werden, die im neuen Schaltzustand geöffnet sein müssen. Aufgrund ihrer Strombegrenzungseigenschaften verhindern dabei der dritte und vierte Schalter, daß im dritten Schaltzustand unzulässig hohe Kurzschlußströme fließen.

Eine andere Möglichkeit für einen Transformator mit einer einzigen weiteren Wicklung besteht darin, daß

der dritte und vierte Schalter, d.h. die beiden Schalter, mit denen die beiden Enden der weiteren Wicklung mit dem Anschluß-Verbindungsleiter der Stelleinheit verbindbar sind, nicht unmittelbar zu diesem Anschluß-Verbindungsleiter führen. Statt dessen sind der dritte und vierte Schalter durch einen weiteren Leiter unmittelbar galvanisch leitend miteinander verbunden und ist zwischen diesem weiteren Leiter und dem Anschluß-Verbindungsleiter eine Schaltungsanordnung vorgesehen, die einerseits die beiden Leiter elektrisch leitend miteinander verbindet und andererseits das Fließen eines unzulässig großen Stroms von einem dieser beiden Leiter auf den anderen verhindert. Diese Schaltungsanordnung kann im einfachsten Fall ein Schalter sein, der immer dann geöffnet wird, wenn die Stelleinheit in ihren dritten Schaltzustand gebracht werden soll, in welchem über diesen Schalter ansonsten ein unzulässig hoher Kurzschlußstrom fließen würde. Allerdings können solche Schalter nur zu ganz bestimmten Zeitpunkten geöffnet werden, so daß hiermit noch nicht die optimale Umschaltgeschwindigkeit erzielbar ist.

Statt dessen wird vorzugsweise als Schaltungsanordnung auch hier eine selbsttätig arbeitende Strombegrenzungsschaltung verwendet, die dem durch sie hindurchfließenden Strom einen nur sehr kleinen, konstanten Widerstand entgegensetzt, solange dieser Strom kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist. Nähert sich der Strom diesem Grenzwert jedoch zu sehr an, so vergrößert die Strombegrenzungsschaltung in stetiger Weise ihren Widerstand, so daß der Strom den vorgegebenen Grenzwert nicht übersteigen kann. Im Gegensatz zu einem einfachen Schalter, der beim Öffnen den ihn durch-

fließenden Strom schlagartig auf den Wert Null begrenzt, hat dieser stetige Begrenzungsvorgang den Vorteil, daß bei ihm keine Spannungsspitzen in der Ausgangsspannung der Stelleinheit auftreten. Der Grenzwert wird so gewählt, daß er nur wenig größer ist, als derjenige Strom, der im ersten oder zweiten Schaltzustand durch die weitere Wicklung und auch über die in diesen beiden Schaltzuständen mit der weiteren Wicklung in Reihe liegende Strombegrenzungsschaltung fließen muß.

Da bei dieser Anordnung der weitere Leiter, der den dritten und den vierten Schalter miteinander verbindet, die weitere Wicklung kurzschließen würde, wenn der dritte und der vierte Schalter gleichzeitig geschlossen sind, wird hier der Übergang vom ersten in den zweiten Schaltzustand vorzugsweise so durchgeführt, daß zuerst der zweite Schalter geschlossen wird, der das zweite Ende der weiteren Wicklung mit dem ausgangseitigen Ende der ersten Wicklung verbindet. Da im ersten Schaltzustand der erste Schalter geschlossen ist, der das erste Ende der weiteren Wicklung mit dem eingangsseitigen Ende der ersten Wicklung verbindet, und da dieser erste Schalter zunächst geschlossen bleibt, liegen somit die beiden Wicklungen vorübergehend elektrisch zueinander parallel und die Stelleinheit befindet sich im dritten Schaltzustand. Dabei verhindert die Strombegrenzungsschaltung, daß über den geschlossenen zweiten Schalter und den ebenfalls noch geschlossenen vierten Schalter, der das zweite Ende der weiteren Wicklung mit dem weiteren Leiter und damit auch mit dem Anschluß-Verbindungsleiter verbindet, ein unzulässig hoher Kurzschlußstrom fließt. Der Umschaltvorgang wird dann in der Weise fortgesetzt, daß der vierte Schalter geöffnet und danach der dritte Schalter geschlossen wird,

der das erste Ende der weiteren Wicklung mit dem weiteren Leiter verbindet. Auch bei dieser Schalterstellung befindet sich die Stelleinheit im dritten Schaltzustand, da der erste und der zweite Schalter noch immer geschlossen sind. Ein unzulässig hoher Kurzschlußstrom könnte jetzt über den ersten und dritten Schalter fließen, was aber wieder durch die Strombegrenzungsschaltung verhindert wird. Schließlich wird dann der erste Schalter geöffnet, so daß die Stelleinheit in den zweiten Schaltzustand übergeht.

Entsprechendes gilt für das Umschalten vom zweiten in den ersten Schaltzustand.

Soll die Stelleinheit nicht übergangsweise sondern für längere Zeit im dritten Schaltzustand gehalten werden, so kann vorteilhafterweise die Strombegrenzungsschaltung so ausgebildet sein, daß sie auf wenigstens einen zweiten Strombegrenzungswert umgeschaltet werden kann, der wesentlich niedriger als der erste Strombegrenzungswert, vorzugsweise gleich Null ist. Auf diese Weise ist dann praktisch die zur ersten Wicklung des Transformators parallel liegende weitere Wicklung völlig von der Eingangsspannung U_E getrennt und es fließt zum Anschlußverbindungsleiter überhaupt kein Kurzschlußstrom mehr.

Eine selbsttätig arbeitende Strombegrenzungsschaltung hat gegenüber einem Schalter neben der bereits erwähnten Vermeidung von Schaltspitzen den Vorteil, daß sie ohne jegliche Verzögerung verhindert, daß der durch sie hindurchfließende Strom den vorgegebenen Grenzwert übersteigt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist vorgesehen, daß der Grenzwert, auf den die Strombegrenzungsschaltung den sie durchfließenden Strom begrenzt, nicht nur zwischen zwei Werten hin- und her-

geschaltet sondern in einem vorgegebenen Bereich kontinuierlich verändert werden kann. Dadurch ist es einerseits möglich den im dritten Schaltzustand fließenden Kurzschlußstrom auf einen unkritischen Wert zu begrenzen und andererseits die Ströme, die im ersten bzw. zweiten Schaltzustand durch die betreffende weitere Wicklung fließen, erforderlichenfalls zu steuern bzw. zu regeln.

Werden als Schalter Triacs verwendet, die bekanntlich zu beliebigen Zeitpunkten geschlossen aber nur beim Nulldurchgang des sie durchfließenden Stroms geöffnet werden können, so müssen bei den oben beschriebenen Umschaltvorgängen keine besonderen weiteren Kriterien hinsichtlich der Schaltzeitpunkt beachtet werden.

Für die verschiedenen Ausführungsformen von erfindungsgemäßen Stelleinheiten mit einem Transformator mit einer einzigen weiteren Wicklung ergeben sich beim Umschalten folgende Zeitabläufe:

Umfaßt eine Stelleinheit einen Transformator mit einer einzigen weiteren Wicklung und vier Schalter, von denen der erste und zweite als Triac und der dritten und vierte als Strombegrenzungsschaltung ausgebildet ist, so können beim Umschalten vom ersten (zweiten) in den zweiten (ersten) Schaltzustand die bis zum Schaltbeginn offenen Schalter, d.h. der zweite (erste) und dritte (vierte) Schalter sofort und ohne jede Verzögerung geschlossen werden, wodurch die Stelleinheit in den dritten Schaltzustand übergeht. Um von diesem in den zweiten (ersten) Schaltzustand zu gelangen, müssen der erste (zweite) und vierte (dritte) Schalter geöffnet werden. Da hier angenommen wird, daß der erste (zweite) Schalter ein Triac ist, ist dies nur dann möglich, wenn der ihn

und die weitere Wicklung durchfließende Kurzschlußstrom einen Nulldurchgang aufweist. Dies führt zu einer zeitlichen Verzögerung, die im ungünstigsten Fall eine halbe Periode des Wechselstroms betragen kann. Dies gilt in gleicher Weise, wenn die Stelleinheit den dritten Schaltzustand nicht nur beim Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand kurzzeitig durchläuft sondern sich längere Zeit im dritten Schaltzustand befunden hat und von diesem in den ersten oder zweiten Schaltzustand gebracht werden soll.

Auch der folgende Effekt tritt bei allen diesen Übergängen immer dann ein, wenn der dritte Schaltzustand verlassen wird: Nach dem Öffnen der Schalter fließt im ersten bzw. zweiten Schaltzustand durch die dann an ihrer Steuerspannung liegende weitere Wicklung ein Strom, der von einer ganz anderen Spannungsquelle als der Kurzschlußstrom, nämlich im ersten Schaltzustand von der Eingangsspannung der Stelleinheit und im zweiten Schaltzustand von der Ausgangsspannung der Stelleinheit getrieben wird; dieser Strom ist in Abhängigkeit vom Laststrom gegen den vor dem Öffnen der Schalter fließenden Kurzschlußstrom phasenverschoben, d.h. im Regelfall sind diese beiden Ströme nicht phasengleich. Somit tritt also bei der Verwendung von Triacs beim Übergang vom dritten in den zweiten bzw. ersten Schaltzustand in der dann an der Steuerspannung liegenden weiteren Wicklung eine starke Änderung des durch diese weitere Wicklung hindurchfließenden Stroms auf, was sich in der Ausgangsspannung der Stelleinheit durch eine Spannungsspitze auf der ersten auf das Öffnen des betreffenden Schalters folgenden Halbwelle bemerkbar macht. Erst die zweite folgende Halbwelle besitzt dann den exakten neuen Amplitudenwert und weist keinerlei Überschwinger oder Spannungsspitzen mehr auf.

Bei allen diesen Umschaltvorgängen kann sich somit in Verbindung mit der oben erwähnten Wartezeit bis zum Eintreten des nächsten Nulldurchgangs des Kurzschlußstroms eine Gesamtumschaltdauer ergeben, die für bestimmte Anwendungsfälle zu lang ist.

Noch etwas ungünstiger ist die Situation bei einer Stelleinheit, bei der der Transformator eine einzige weitere Wicklung aufweist und bei der alle vier Schalter als Triacs ausgebildet sind. Wie oben bereits geschildert, dürfen hier beim Übergang vom ersten (zweiten) Schaltzustand in den zweiten (ersten) Schaltzustand die beiden bis zu Beginn des Umschaltvorganges offenen Schalter, nämlich der zweite (erste) und der dritte (vierte) Schalter nicht gleichzeitig geschlossen werden. Vielmehr darf hier zunächst nur der zweite (erste) Schalter geschlossen werden; dann muß der vierte (dritte) Schalter geöffnet werden, was bei Verwendung von Triacs erst beim nächsten Nulldurchgang des diesen Schalter durchfließenden Stromes möglich ist. Mit einem gewissen zeitlichen Sicherheitsabstand kann dann der dritte (vierte) Schalter geschlossen werden und erst danach ist es möglich, den ersten (zweiten) Schalter zu öffnen, wofür wieder ein Strom-Nulldurchgang abgewartet werden muß. Beim Umschalten vom ersten in den zweiten Schaltzustand oder umgekehrt kann sich hier also im ungünstigsten Fall eine Wartezeit von zwei Halbperioden ergeben. Wird die Stelleinheit längere Zeit im dritten Schaltzustand gehalten, so können der dritte und vierte Schalter geöffnet werden. Soll dann ein Übergang in den ersten (oder zweiten) Schaltzustand erfolgen, so muß zunächst der vierte (dritte) Schalter geschlossen werden, was jederzeit geschehen kann; hierauf wird dann der zweite (erste) Schalter geöffnet, wofür wieder ein Strom-Nulldurchgang abgewartet werden muß.

Da auch in diesen Fällen der Kurzschlußstrom und der Strom, der im neuen Schaltzustand durch die weitere Wicklung fließt, im Regelfall gegeneinander phasenverschoben sind, tritt wiederum die oben beschriebene Spannungsspitze auf der ersten Halbwelle der Ausgangsspannung auf, die auf den letzten Schaltschritt des gesamten Umschaltvorganges folgt. Es ergeben sich also Gesamtumschaltzeiten, die beim Übergang vom dritten in den ersten oder zweiten Schaltzustand genauso lang sind, wie bei der ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Stelleinheit, und die beim Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand sogar noch länger sind.

Will man die Umschaltvorgänge bei diesen Ausführungsformen noch schneller gestalten, so ist erfindungsgemäß vorgesehen, statt Triacs elektronische Schalter zu verwenden, die zu beliebigen Zeitpunkten nicht nur geschlossen sondern auch wieder geöffnet werden können. Hierzu bieten sich beispielsweise V-MOS-Transistoren an, von denen jeweils zwei mit ihren Source-Drain-Strecken mit entgegengesetzter Polung in Reihe geschaltet werden müssen, um einen Wechselspannungsschalter aufzubauen. Mit diesen Schaltern entfallen beim Öffnen die Wartezeiten bis zum nächsten Strom-Nulldurchgang. Überdies kann für die Öffnungsvorgänge, die jeweils aus dem dritten Schaltzustand in den ersten oder zweiten Schaltzustand führen, ein vom Nulldurchgang des Kurzschlußstroms unabhängiges Schaltkriterium angewendet werden, das zu einer möglichst geringen Änderung des Stroms in der nach dem Umschaltvorgang an ihrer Steuerspannung liegenden weiteren Wicklung führt. Verwendet man beispielsweise als Schaltzeitpunkt denjenigen Zeitpunkt, in welchem der Strom, der nach dem Umschaltvorgang durch die an ihrer Steuerspannung liegende weitere Wicklung fließt, seinen Nulldurchgang

besitzt, so läßt sich erreichen, daß bereits bei der ersten Halbwelle, die auf diesen Schaltvorgang folgt, die Ausgangsspannung der Stelleinheit ohne Spannungsspitzen oder Spannungseinbrüche exakt den neuen Amplitudenwert besitzt.

Da in dem Zwischenzeitraum, in dem sich die Stelleinheit im dritten Schaltzustand befindet, ein anderer Strom durch die weitere Wicklung fließt, als dann, wenn die weitere Wicklung im neuen Schaltzustand an ihrer Steuerspannung liegt, wird erfindungsgemäß der Zeitabstand des Nulldurchganges des zuletzt genannten Stroms vom Nulldurchgang der Eingangs-Wechselspannung zu einem früheren Zeitpunkt gemessen und gespeichert, in dem sich die Stelleinheit in dem betreffenden Schaltzustand befindet. Mit Hilfe dieses gespeicherten Wertes kann dann ausgehend von einem Nulldurchgang der Eingangs-Wechselspannung der oben erwähnte günstige Schaltzeitpunkt bestimmt werden.

Somit lassen sich also die Zeiten erheblich verkürzen, die zwischen dem Einleiten eines Umschaltvorganges und dem Zeitpunkt vergehen, in welchem die Ausgangsspannung ihren neuen Amplitudenwert stabil, d.h. ohne aufgeprägte Spannungsspitzen oder Spannungseinbrüche erreicht hat. Befindet sich die Stelleinheit im ersten oder zweiten Schaltzustand und wird ein Umschalten in den zweiten oder ersten Schaltzustand erforderlich, so läßt sich bei den mit V-MOS-Transistoren als Schaltern ausgestatteten Ausführungsformen die erste Hälfte der hierbei in der Ausgangsspannung auftretenden Änderung zu jedem beliebigen Zeitpunkt sofort und die zweite Hälfte dieser Änderung innerhalb einer Halbperiode der zu schaltenden Wechselspannung durchführen.

Eine solche Änderung bzw. Beeinflussung der Ausgangsspannung in zwei sehr rasch aufeinanderfolgenden Schritten ist außerordentlich vorteilhaft, weil hierdurch dem System trotz der großen Schnelligkeit, mit der der neue Zustand erreicht wird, genügend Zeit bleibt, um ohne Schaltspitzen und Überschwinger von einem Schaltzustand in den anderen zu wechseln.

Ein vierter Schaltzustand kann für eine Stelleinheit, deren Transformator nur eine einzige weitere Wicklung aufweist, dadurch hergestellt werden, daß die Schalter der Stelleinheit so betätigt werden, daß der Stromkreis der weiteren Wicklung einen hohen Widerstandswert besitzt, der auch nach Heruntertransformation auf der Seite der ersten Wicklung einen hohen Widerstandswert liefert. In diesem Schaltzustand wird die gesamte Magnetisierung des Transformator-kerns von der Durchflutung der ersten Wicklung bewirkt. Es tritt dann an der ersten Wicklung ein von der Größe dieser Durchflutung und damit von der Größe des Laststroms abhängiger Spannungsabfall auf. Diese Drosselwirkung der ersten Wicklung im vierten Schaltzustand kann dazu verwendet werden, beim Auftreten eines Kurzschlusses an der Last die der Last zugeführte Leistung auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen.

B) Stelleinheit mit zwei weiteren Wicklungen

Gemäß einer zweiten Ausführungsform kann der Transformator aber auch zwei weitere Wicklungen aufweisen, der Durchflutungen und Windungsverhältnisse zur ersten Wicklung denselben Bedingungen genügen, wie sie oben für die eine weitere Wicklung angegeben wurden. In diesem Fall wird die Stelleinheit dadurch in den ersten Schaltzustand gebracht, daß nur an die erste weitere Wicklung eine Steuerungsspannung angelegt wird; in den zweiten Schaltzustand

wird die Stelleinheit demgegenüber dadurch gebracht, daß nur an die zweite weitere Wicklung eine Steuerspannung angelegt wird.

Vorzugsweise werden dabei die Windungszahlen, die Steuerspannungen und der Wicklungssinn der beiden weiteren Wicklungen bezüglich der ersten Wicklung so gewählt, daß die Amplituden der beiden induzierbaren Spannungen ΔU_1 und ΔU_2 in etwa gleich groß sind, die beiden induzierbaren Spannungen aber mit entgegengesetzten Vorzeichen auf die Eingangsspannung U_E aufprägbare sind. In diesem Fall gelten dann wieder die beiden obigen Gleichungen (4) bzw. (5) für den ersten bzw. zweiten Schaltzustand.

Zwar können die Steuerspannungen auf verschiedene Weise erzeugt und an die weiteren Wicklungen angelegt werden. Vorzugsweise wird jedoch im ersten Schaltzustand die erste weitere Wicklung mit Hilfe der Schalter unmittelbar galvanisch mit der Eingangsspannung U_E der Stelleinheit verbunden, während im zweiten Schaltzustand die zweite weitere Wicklung unmittelbar galvanisch mit der Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit verbunden wird, so daß man in beiden Schaltzuständen eine Spartransformator-Anordnung erhält. Dabei findet die eine der beiden weiteren Wicklungen ausschließlich als addierende Wicklung und die andere ausschließlich als subtrahierende Wicklung Verwendung. Damit stehen zwar ebenfalls nur eine additive induzierte Spannung $+\Delta U_1$ und eine subtraktive induzierte Spannung $-\Delta U_2$ zur Verfügung. Diese beiden Spannungen sind aber nicht über die obigen Gleichungen (6) und (7) zwangsweise miteinander verknüpft, da für jede der beiden weiteren Wicklungen eine eigene Windungszahl w_{w1} bzw. w_{w2} gewählt werden kann. Für die aufprägbaren induzierten Spannungen gelten hier die Gleichungen:

$$+ \Delta U_1 = \frac{w_1}{w_{w1}} \cdot U_E \quad (9)$$

und

$$- \Delta U_2 = \frac{w_1}{w_1 + w_{w2}} U_E \quad (10)$$

Wählt man w_{w1} und w_{w2} beispielsweise so, daß

$$w_{w1} = w_1 + w_{w2}$$

gilt, so lassen sich zur Eingangsspannung U_E genau symmetrisch liegende Ausgangsspannungen U_{A+} und U_{A-} erzielen. Alternativ hierzu kann aber auch gewünschtenfalls die aus den Gleichungen (9) und (10) ersichtliche Asymmetrie zwischen $+ \Delta U_1$ und $- \Delta U_2$ noch verstärkt werden.

Außerdem erlaubt es diese Ausführungsform, jeweils ein Ende der beiden weiteren Wicklungen fest anzuschließen und nur das jeweils andere Ende mit Hilfe eines Schalters entweder elektrisch leitend an die Eingangs- bzw. Ausgangsspannung zu legen oder von dieser abzutrennen. Es werden also weniger Schalter benötigt.

Wie bereits erwähnt ist eine solche Transformatorschaltung vor allem dann von Vorteil, wenn die zu induzierenden Spannungen $+ \Delta U_1$ und $- \Delta U_2$ nur einen vergleichsweise kleinen Prozentsatz der Eingangsspannung U_E ausmachen. Die Vindungsverhältnisse w_1/w_w bzw. w_1/w_{w1} und w_1/w_{w2} sind daher grundsätzlich kleiner 1 und liegen vorzugsweise in einem Bereich von 1 : 3 bis 1 : 200.

Auch diese zweite Ausführungsform kann in verschiedenen Varianten aufgebaut werden, die die Herstellung eines

dritten Schaltzustandes, in dem die Ausgangsspannung der Stelleinheit praktisch gleich der Eingangsspannung ist, auf unterschiedliche Weise ermöglichen.

Eine erste Möglichkeit besteht darin, daß Schalter vorgesehen sind, mit deren Hilfe die beiden weiteren Wicklungen jeweils kurzgeschlossen werden können. Auch hier müssen zur Vermeidung einer Überlastung des Transformators besondere Maßnahmen vorgesehen werden, die sicherstellen, daß nur für eine der beiden weiteren Wicklungen der oder die zum Anlegen einer Steuerspannung dienenden Schalter geschlossen sind. Für die bevorzugte Ausführungsform mit zwei weiteren Wicklungen, von denen die eine fest als addierende Wicklung und die andere fest als subtrahierende Wicklung verdrahtet ist, bedeutet dies, daß die beiden Schalter nicht überlappend betrieben werden. Auch muß verhindert werden, daß an eine oder beide weitere Wicklungen eine Steuerspannung angelegt wird, während der zugehörige Kurzschlußschalter geschlossen ist.

Um ein gleichzeitiges Schließen der betreffenden Schalter unmöglich zu machen, wird hier ebenfalls der Schaltzustand eines jeden Schalters mit Hilfe einer zugehörigen Sensoreinheit überwacht und ein Schließbefehl für einen bisher offenen Schalter durch eine Sperrschaltung unterdrückt, wenn das Ausgangssignal der Sensoreinheit der anderen Schalter anzeigt, daß einer dieser anderen Schalter noch geschlossen ist.

Damit beim Umschalten von einem Schaltzustand in den anderen möglichst geringe Energieverluste und möglichst kleine Schaltspitzen entstehen, ist es bei dieser Variante erforderlich, die Schalter bei bestimmten Phasenwinkeln bzw. in bestimmten Phasenwinkelbereichen des magnetischen

Flusses, der die erste Wicklung des Transformators durchsetzt, zu öffnen bzw. zu schließen. Diese Phasenwinkel bzw. Phasenwinkelbereiche werden dabei so gewählt, daß sich dieser magnetische Fluß durch den Öffnungs- bzw. Schließvorgang wenig ändert.

Dies führt jedoch zu Schaltkriterien, die das Umschalten von einem Schaltzustand in einen anderen so verzögern, daß der neue Amplitudenwert der Ausgangsspannung nicht innerhalb einer Schwingungsperiode der Lastwechselspannung stabil erreicht werden kann.

Daher ist bei einer zweiten Variante eines Transformators, der zwei weitere Wicklungen aufweist, die jeweils mit einem ihrer beiden Ende mit dem von der Spannungsquelle her gesehen vorderen bzw. hinteren Ende der ersten Wicklung verbunden sind, vorgesehen, daß zur Erzielung des dritten Schaltzustandes eine aus diesen beiden weiteren Wicklungen bestehende Serienschaltung zur ersten Wicklung parallelgeschaltet wird; dabei können diese beiden miteinander in Reihe liegenden weiteren Wicklungen als eine einzige, einen durchgehenden Wicklungssinn aufweisende Wicklung betrachtet werden.

Man erhält wieder einen kurzgeschlossenen Transformator mit zwei auf dem Kern antiparallel gewickelten Wicklungen, die an der gleichen Spannung liegen. Die Ströme in diesen antiparallelen Wicklungen versuchen, im Kern des Transformators einander entgegengerichtete Magnetfelder aufzubauen, die sich im wesentlichen gegenseitig aufheben. Es gilt wieder die obige Gleichung (8). Der durch die beiden miteinander in Serie liegenden weiteren Wicklungen fließende Strom ist sehr klein, da diese weiteren Wicklungen einen wesentlich größeren Scheinwiderstand besitzen als

die erste Wicklung. Somit fließt auch hier der Laststrom praktisch ausschließlich durch die erste Wicklung.

Prinzipiell genügen bei einem solchen Transformator, der zwei weitere Wicklungen in der oben angegebenen Art besitzt, drei Schalter, um die betreffende Stelleinheit in die genannten drei verschiedenen Schaltzustände bringen zu können.

Werden keine weiteren Maßnahmen getroffen, so muß auch hier sorgfältig darauf geachtet werden, daß nicht durch gleichzeitiges Schließen der Schalter die Eingangsspannung der Stelleinheit an die zur ersten Wicklung parallelgeschalteten weiteren Wicklungen angelegt wird, in denen dann ein unzulässig hoher Kurzschlußstrom fließen würde. Dies würde allerdings bedeuten, daß auch hier wieder für das Öffnen und Schließen der Schalter bestimmte Schaltkriterien beachtet werden müßten, die beim Übergang von einem Schaltzustand in einen anderen das Erreichen des neuen Amplitudenwertes verzögern würden.

Um dies zu vermeiden, ist hier vorzugsweise die Verwendung einer Strombegrenzungsschaltung vorgesehen.

Vorzugsweise sind dabei die beiden Schalter, mit denen die beiden freien Enden der beiden weiteren Wicklungen mit dem Anschluß-Verbindungsleiter verbindbar sind, ebenfalls durch einen weiteren Leiter unmittelbar galvanisch leitend miteinander verbunden, und ist zwischen dem weiteren Leiter und dem Anschluß-Verbindungsleiter eine Schaltungsanordnung der oben unter A) beschriebenen Art vorgesehen, die vorzugsweise wieder als Strombegrenzungsschaltung ausgebildet ist.

Auch hier wird beim Übergang vom ersten in den zweiten Schaltzustand oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand zuerst der bisher offene Schalter geschlossen, wodurch die Stelleinheit vorübergehend in den dritten Schaltzustand übergeht; die Strombegrenzungsschaltung verhindert dabei wiederum das Fließen eines unzulässig hohen Kurzschlußstroms. Kurze Zeit später wird der im bisherigen Schaltzustand geschlossene Schalter geöffnet, wodurch die Stelleinheit in den neuen Schaltzustand übergeht.

Das oben unter A) über die vorzugsweise Ausbildung und Ansteuerung der Strombegrenzungsschaltung Gesagte gilt hier in entsprechender Weise.

Für das Umschalten von einem Schaltzustand in einen anderen ergeben sich bei der vorliegenden Ausführungsform folgende Zeitabläufe:

Bei Verwendung von Triacs als Schalter muß im ungünstigsten Fall ebenfalls eine Halbperiode gewartet werden, bis beim Übergang vom dritten in den ersten oder zweiten Schaltzustand der entsprechende Schalter geöffnet werden kann. Dabei ist es wieder ohne Bedeutung, ob sich die Stelleinheit längere Zeit im dritten Schaltzustand befunden hat oder ihn beim Umschalten vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand kurzzeitig durchläuft.

Auch hier ist beim Umschalten in den ersten oder zweiten Schaltzustand der Strom, der nach Beendigung des Umschaltvorganges durch die weitere Wicklung fließt, die im neuen Schaltzustand an ihrer Steuerspannung liegt, gegen den zuvor durch diese Wicklung fließenden Kurzschlußstrom phasenverschoben, so daß sich dieselbe störende Spannungsspitze ergibt wie bei den oben beschriebenen Ausführungsformen.

Zur schnelleren Durchführung der Umschaltvorgänge ist es auch hier möglich, statt Triacs elektronische Schalter zu verwenden, die beispielsweise jeweils aus einer Serienschaltung von zwei V-MOS-Transistoren bestehen und zu beliebigen Zeitpunkten geschlossen und geöffnet werden können.

Wieder entfallen beim Öffnen die Wartezeiten bis zum nächsten Strom-Nulldurchgang und es kann das oben Beschriebene, vom Nulldurchgang des Kurzschlußstroms unabhängige Schaltkriterium verwendet werden, wenn zum Übergang aus dem dritten Schaltzustand in den ersten oder zweiten Schaltzustand ein Schalter geöffnet werden muß.

Wieder wird als Schaltzeitpunkt ein Zeitpunkt verwendet, in dem der Strom, der nach dem Umschaltvorgang durch die an ihrer Steuerspannung liegende weitere Wicklung fließt, seinen Nulldurchgang besitzt. Da im dritten Schaltzustand ein anderer Strom durch die beiden weiteren Wicklungen fließt, als dann, wenn im neuen Schaltzustand die entsprechende weitere Wicklung an ihrer Steuerspannung liegt, wird auch hier der Zeitabstand des Nulldurchganges des zuletzt genannten Stroms vom Nulldurchgang der Eingangs-Wechselspannung in einem vorausgehenden Zeitraum gemessen und der Meßwert gespeichert. Mit Hilfe dieses gespeicherten Wertes kann dann wieder der oben genannte günstige Schaltzeitpunkt bestimmt werden.

Somit lassen sich auch hier die für die Umschaltvorgänge benötigten Zeitspannen außerordentlich kurz gestalten. Befindet sich die Stelleinheit im ersten oder im zweiten Schaltzustand und wird ein Umschalten in den zweiten oder ersten Schaltzustand erforderlich, so läßt sich bei den mit V-MOS-Transistoren als Schaltern aus-

gestatteten Ausführungsformen die erste Hälfte der hierbei in der Ausgangsspannung auftretenden Änderung zu jedem beliebigen Zeitpunkt sofort und die zweite Hälfte dieser Änderung innerhalb einer Halbperiode der zu schaltenden Wechselspannung durchführen.

Eine solche Änderung bzw. Beeinflussung der Ausgangsspannung in zwei sehr rasch aufeinanderfolgenden Schritten ist außerordentlich vorteilhaft, weil hierdurch dem System trotz der großen Schnelligkeit, mit der der neue Zustand erreicht wird, genügend Zeit bleibt, um ohne Schaltspitzen und Überschwinger von einem Schaltzustand in den anderen zu wechseln.

Eine solche in zwei Schritten erfolgende Änderung ist allerdings bei einer einzelnen Stelleinheit nicht möglich, wenn diese sich bereits im dritten Schaltzustand befindet und aus diesem heraus in den ersten oder zweiten Schaltzustand gebracht werden soll. Sie ändert dabei zwar die Ausgangsspannung nur um die Hälfte der maximal möglichen Änderung, doch muß diese Hälfte in einem einzigen Schritt bewältigt werden.

Sollen bei gegebener Eingangsspannung der Stelleinheit an den Ausgangsanschlüssen mehr als drei verschiedene Ausgangsspannungen nacheinander wahlweise zur Verfügung stehen, so kann der Transformator zwar mehrere weitere Wicklungen aufweisen, die jeweils unterschiedliche Windungszahlen besitzen können. Diese Windungszahlen können innerhalb des oben erwähnten Bereiches von 1:3 bis 1:200 liegen, sollten sich aber nur soweit voneinander unterscheiden, daß dann, wenn an die weitere Wicklung mit der kleinsten Windungszahl die zugehörige Spannung angelegt ist, in den anderen weiteren Wicklungen keine

zu großen Spannungen induziert werden. Es können entsprechend viele Schalter vorgesehen werden, mit deren Hilfe sich jede dieser Wicklungen an eine Steuerspannung anschließen bzw. von dieser trennen läßt. Auch ist es möglich, eine Steuerspannung jeweils nur an eine oder gleichzeitig an zwei oder mehr der weiteren Wicklungen anzulegen.

C) Stelleinheit mit einer weiteren Wicklung, an die mehr als zwei Steuerspannungen anlegbar sind.

Eine bevorzugte Möglichkeit, gemäß der Erfindung am Ausgang einer einzigen Stelleinheit nacheinander mehr als drei verschiedene Ausgangsspannungen wahlweise zur Verfügung zu stellen, besteht jedoch darin, an die wenigstens eine weitere Wicklung mit Hilfe von Schaltern alternativ eine von mehreren Steuerspannungen $U_{S1}, \dots, U_{S2q}$ anzulegen, die sich zumindest teilweise in ihrer Amplitude voneinander unterscheiden. Dabei ist q irgendeine ganze Zahl größer 1.

Zur Erzeugung dieser Steuerspannungen $U_{S1}, \dots, U_{S2q}$ findet vorzugsweise eine Wechselspannungsquelle Verwendung, die mehrere Abgriffe aufweist, zwischen denen verschiedene Abgriffsspannungen $U_{X1}, \dots, U_{Xp}$ ständig zur Verfügung stehen und abgreifbar sind. p ist ebenfalls eine ganze Zahl größer 1 und vorzugsweise kleiner als q . Mit Hilfe von Schaltern können diese Abgriffsspannungen entweder einzeln oder gruppenweise addiert als Steuerspannungen an die weitere Wicklung des Transformators angelegt werden.

Es ist ein wesentlicher Gesichtspunkt der Erfindung, eine Transformatorschaltung zu schaffen, die in einem vorgebbaren Änderungsbereich $\pm \Delta U_{\max}$ eine digitale

Änderung der an eine Last angelegten Spannung und damit auch der an die Last abgegebenen Leistung ermöglicht. Dabei kann in Sonderfällen der Änderungsbereich auch nur positiv oder nur negativ sein; d.h. es kann nur die additive oder nur die subtraktive Aufprägung von induzierten Spannungen ΔU auf die Eingangs- bzw. Versorgungsspannung erforderlich sein. Im folgenden wird jedoch der allgemeine Fall eines zur Änderung Null (Eingangsspannung gleich Ausgangsspannung) symmetrischen Änderungsbereiches $\pm \Delta U_{\max}$ erläutert.

Unter einer digitalen Änderung der Ausgangsspannung in diesem Bereich $\pm \Delta U_{\max}$ wird dabei verstanden, daß es sowohl zur positiven als auch zur negativen Seite hin eine kleinste aufprägbare Spannungsänderung $+\Delta U_{\min}$ bzw. $-\Delta U_{\min}$ gibt und daß im positiven Teil des Änderungsbereiches q positiv aufprägbare Spannungen $+\Delta U_{\nu}$ ($\nu = 1, \dots, q$) und im negativen Teil des Änderungsbereiches q negative aufprägbare Spannungen $-\Delta U_{\nu}$ ($\nu = 1, \dots, q$) zur Verfügung stehen, wobei jeweils gilt:

$$+\Delta U_{\nu} = \nu \cdot (+\Delta U_{\min})$$

und

$$-\Delta U_{\nu} = \nu \cdot (-\Delta U_{\min})$$

D.h., daß sowohl im positiven als auch im negativen Teil des Änderungsbereiches jede beliebige aufprägbare Spannung $\pm \Delta U_{\nu}$ ein ganzzahliges Vielfaches der zugehörigen kleinsten aufprägbaren Spannung $\pm \Delta U_{\min}$ ist und daß ν alle ganzen Zahlen zwischen 1 und q annehmen kann. Die in jeder Richtung größtmögliche induzierbare Spannung ist gleichzeitig die Grenze des Änderungsbereichs:

$$\pm q \Delta U_{\min} = \pm \Delta U_{\max}$$

Man sieht, daß der Änderungsbereich sowohl durch Wahl der kleinsten Änderung $\pm \Delta U_{\min}$ und damit der Schrittweite, als auch durch Wahl der Anzahl q der Schnitte variiert werden kann. Eine Vergrößerung der Schrittweite führt allerdings zu einer Verringerung der Genauigkeit, mit der z.B. bei Verwendung der erfindungsgemäßen Transformatorschaltung als Regelvorrichtung die Lastspannung U_L auf einem vorgegebenen Wert konstant gehalten werden kann. Andererseits bedeutet eine Vergrößerung von q eine Vergrößerung des technischen Aufwandes. Es muß also bei der Festlegung der Größen q und $\pm \Delta U_{\min}$ eine auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmte Optimierung vorgenommen werden.

Vorzugsweise sind die Amplituden von $+\Delta U_{\min}$ und $-\Delta U_{\min}$ zumindest annähernd gleich groß, so daß also auch für die übrigen induzierbaren Spannungen zumindest näherungsweise gilt:

$$|+\Delta U_v| = |-\Delta U_v|$$

In entsprechender Weise sind auch die an die weitere Wicklung anzulegenden Steuerspannungen U_{S_v} gemäß der Erfindung digital strukturiert, d.h. es gibt eine kleinste Steuerspannung $U_{S_{\min}}$, die zur Aufprägung der kleinsten induzierten Spannung $\Delta U_{\min}$ führt, und die übrigen Steuerspannungen sind ganzzahlige Vielfache dieser kleinsten Steuerspannung:

$$U_{S_v} = v \cdot U_{S_{\min}}$$

wobei v wieder alle Werte von 1 bis q durchläuft. Um den oben angegebenen symmetrischen Änderungsbereich $\pm \Delta U_{\max}$ mit $2q$ Schritten überdecken zu können, müssen nur q Steuerspannungen U_{Sv} vorgesehen werden, da mit Hilfe der Schalter jede von der Wechselspannungsquelle abgegriffene Spannung auf zwei verschiedene Weisen so an die weitere Wicklung angelegt werden kann, daß in dem einen der beiden Fälle der Wicklungssinn der weiteren Wicklung bezüglich der ersten Wicklung des Transformators dem Wicklungssinn im anderen Falle gerade entgegengesetzt ist. Hierdurch wird dann die induzierte Spannung ΔU_v im einen Fall additiv und im anderen Fall subtraktiv auf die Eingangsspannung der Stelleinheit aufgeprägt.

Auch hier besteht wieder die Möglichkeit, die weitere Wicklung kurzzuschließen, so daß die Ausgangsspannung der Stelleinheit gleich der Eingangsspannung ist, oder den Stromkreis der weiteren Wicklung zu unterbrechen, um durch die hieraus resultierende Drosselwirkung der ersten Wicklung den Laststrom zu begrenzen.

Zur Erzeugung der q Steuerspannungen U_{Sv} ist es erfindungsgemäß nicht erforderlich, an der Wechselspannungsquelle $q+1$ Abgriffe so vorzusehen, daß zwischen allen jeweils unmittelbar benachbarten Abgriffen eine der kleinsten Steuerspannung $U_{S\min}$ entsprechende Abgriffsspannung $U_{X\min}$ abfällt.

Vielmehr werden die Amplituden der Abgriffsspannungen nach einem geeigneten Kode so gestuft, daß sich bei minimaler Anzahl von Abgriffen (und damit auch minimaler Anzahl von Schaltern) alle benötigten Steuerspannungen U_{Sv} durch additive Kombination von mehreren Abgriffsspannungen zusammensetzen lassen, soweit sie nicht direkt einer der Spannungen entsprechen, die zwischen zwei be-

nachbarten Abgriffen zur Verfügung stehen. Damit die kleinste Steuerspannung U_{Smin} zur Verfügung steht, muß, wenigstens ein Paar von benachbarten Abgriffen vorgesehen sein, zwischen denen eine Abgriffsspannung $U_{Xmin} = U_{Smin}$ abfällt. Zwischen den übrigen Paaren von benachbarten Abgriffen können dann zumindest teilweise Abgriffsspannungen vorgesehen werden, die gemäß dem oben erwähnten Kode festzulegende, von 1 verschiedene, ganzzahlige Vielfache der kleinsten Abgriffsspannung U_{Xmin} sind. Der günstigste Kode ist hier der reine Binärkode, bei dem jede Abgriffsspannung nur einmal vorkommt und zwischen aufeinanderfolgenden Abgriffspaaren der Reihe nach die Abgriffsspannungen $1 \cdot U_{Xmin}$, $2 \cdot U_{Xmin}$, $4 \cdot U_{Xmin}$, $8 \cdot U_{Xmin}$ usw. abfallen.

Die Verwendung dieses Kodes setzt jedoch voraus, daß Abgriffspaare, die für die additive Zusammensetzung einer gerade erforderlichen Steuerspannung U_S , nicht benötigt werden, ohne weiteres kurzgeschlossen werden können.

Bei einer erfindungsgemäß bevorzugten Wechselspannungsquelle, die aus einer Zusatz-Transformatoranordnung mit einer Wicklung besteht, an die eine Wechselspannung angelegt ist und die in eine Vielzahl von Wicklungsabschnitten unterteilt ist, zwischen denen die Abgriffe zum Abgreifen der Abgriffsspannungen U_{X1} , ..., U_{Xp} herausgeführt sind, ist die oben erwähnte Bedingung für die Verwendung eines reinen Binärkodes nicht gegeben. Daher wird hier vorzugsweise ein Kode verwendet, der es erlaubt, jede benötigte Steuerspannung von einer Gruppe von unmittelbar aufeinanderfolgenden Abgriffspaaren abzugreifen, soweit sie nicht direkt von einem einzigen Abgriffspaar abgegriffen werden kann. Im all-

gemeinen bedeutet dies, daß zumindest die kleinste Abgriffsspannung U_{Xmin} , in manchen Fällen aber auch einige der ganzzahligen Vielfachen hiervon mehrfach abgreifbar sein müssen. So können z.B. für die Erzeugung von acht Steuerspannungen

$$1 \cdot U_{Smin}, 2 \cdot U_{Smin}, \dots, 8 \cdot U_{Smin}$$

an der Wicklung der Zusatz-Transformatoranordnung vier Wicklungsabschnitte vorgesehen sein, deren Windungszahlen so gewählt sind, daß an den Abgriffen der Reihe nach die Abgriffsspannungen

$$1 \cdot U_{Xmin}, 2 \cdot U_{Xmin}, 4 \cdot U_{Xmin}, 1 \cdot U_{Xmin}$$

abfallen, wobei $U_{Xmin} = U_{Smin}$ ist. Man sieht, daß die Steuerspannungen $1 \cdot U_{Smin}$, $2 \cdot U_{Smin}$ und $4 \cdot U_{Smin}$ direkt am ersten bzw. zweiten bzw. dritten Wicklungsabschnitt (in der obigen Reihe von links gezählt) abgegriffen werden können, während die Steuerspannung $3 \cdot U_{Smin}$ über einer Kombination aus dem ersten und zweiten Wicklungsabschnitt, die Steuerspannung $5 \cdot U_{Smin}$ über einer Kombination aus dem dritten und vierten Wicklungsabschnitt, die Steuerspannung $6 \cdot U_{Smin}$ über einer Kombination aus dem zweiten und dritten Wicklungsabschnitt, die Steuerspannung $7 \cdot U_{Smin}$ über einer Kombination aus dem ersten, zweiten und dritten Wicklungsabschnitt und die Steuerspannung $8 \cdot U_{Smin}$ über der Kombination aus allen vier Wicklungsabschnitten abgegriffen werden können. Der eben als Beispiel angegebene Kode ist aber bei dieser Zahl von benötigten Steuerspannungen und vier zur Verfügung gestellten Wicklungsabschnitten nicht der einzig mögliche. Beispielsweise können alle acht Steuerspannungen auch dann abgegriffen werden, wenn die ganzzahligen Vielfachen der kleinsten Abgriffsspannung dem Kode 1,3,2,2 entsprechen.

Vorzugsweise sind die Windungszahlen der Wicklungsabschnitte so gewählt, daß an dem Abschnitt, der an dem einen der beiden Enden der Wicklungsabschnitts-Reihe liegt, die Abgriffsspannung $1 \cdot U_{Xmin}$ und an dem Abschnitt, der am gegenüberliegenden Ende liegt, die Abgriffsspannung $1 \cdot U_{Xmin}$ direkt abgreifbar sind, wie dies auch beim ersten der beiden obigen Beispiele der Fall ist.

Wesentlich ist, daß der Kode immer so gewählt wird, daß bei minimaler Zahl von Wicklungsabschnitten bzw. Abgriffen alle benötigten Steuerspannungen U_{Sv} zur Verfügung stehen. Außerdem soll nach Möglichkeit die über der Kombination aller Wicklungsabschnitte abgreifbare maximale Wechselspannung gleich oder zumindest nicht wesentlich größer als die maximale benötigte Steuerspannung U_{Smax} sein.

Vorzugsweise besteht die Zusatz-Transformatoranordnung nur aus einer einzigen, in die verschiedenen Abschnitte unterteilten Wicklung, an deren äußerste Enden eine entsprechende Wechselspannung angelegt ist. Hierzu kann beispielsweise die Eingangs- oder die Ausgangsspannung der Stelleinheit selbst dienen.

Um eine Transformatorschaltung, die aus einer einzigen Stelleinheit besteht, an deren weitere Wicklung mit Hilfe von Schaltern in der eben beschriebenen Weise verschiedene Steuerspannungen anlegbar sind, als Spannungskonstanter und/oder Spannungsregler verwenden zu können, ist erfindungsgemäß weiterhin vorgesehen, daß die an die Last angelegte Spannung U_L mit Hilfe einer Meßfühleranordnung gemessen wird, daß ein Komparator das Ausgangssignal

der Meßfühleranordnung mit einem Referenzwert U_{ref} vergleicht, der den Sollwert S_L der Lastspannung repräsentiert, und daß eine Schaltersteuerung vorgesehen ist, die anhand des Differenzsignals, das von der Komparatoranordnung abgegeben wird, die Schalter so steuert, daß die in der ersten Wicklung des Transformators induzierten Spannungsänderungen ΔU_V eventuell auftretenden Schwankungen der Lastspannung U_L entgegenwirken und diese Schwankungen kompensieren.

Will man bei gegebener Versorgungsspannung U_V mehr als drei verschiedene Lastspannungen nacheinander zur Verfügung stellen können, so ist es alternativ zur eben beschriebenen einstufigen Anordnung vorteilhaft, eine Transformatorschaltung vorzusehen, bei der zwei oder mehr Stufen, von denen jede aus einer oder mehreren Stalleinheiten bestehen kann, so miteinander in Reihe geschaltet sind, daß an der ersten Stufe die Versorgungsspannung U_V als Eingangsspannung U_E anliegt, die Ausgangsspannung U_A dieser ersten Stufe als Eingangsspannung U_E an die zweite Stufe angelegt ist, usw. und daß die Ausgangsspannung der letzten Stufe der Last als Lastspannung U_L zugeführt wird. Dabei liegen dann von der Spannungsquelle her gesehen, die ersten Wicklungen der Transformatoren aller Stufen miteinander und mit der Last in Reihe.

Die miteinander in Reihe geschalteten Stufen können jeweils aus einer einzelnen Stelleinheit bestehen, die mit einer oder mehreren, insbesondere zwei weiteren Wicklungen ausgestaltet ist, und gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen zumindest in die durch die obigen Gleichungen (4), (5) und (8) definierten drei verschiedenen Schaltzustände gebracht werden kann.

Alternativ hierzu können die Stufen einer solchen Transformatorschaltung aber auch jeweils aus zwei miteinander in Reihe geschalteten Stelleinheiten bestehen, die zu einem Stelleinheiten-Paar zusammengefaßt sind.

Darunter soll folgendes verstanden werden: Es handelt sich hier um zwei Stelleinheiten, die ebenfalls zwei weitere Wicklungen aufweisen, von denen die eine als addierende und die andere als subtrahierende Wicklung Verwendung findet. Die beiden Transformatoren sind so bemessen, daß jede der beiden Stelleinheiten sowohl in addierender als auch in subtrahierender Weise in etwa die Hälfte der Gesamtspannungsänderung zu bewirken vermag, die vom Stelleinheiten-Paar aufgebracht werden soll. Soll z.B. das Stelleinheiten-Paar seine Eingangsspannung U_{EP} um $\pm \Delta U_P$ ändern können, so kann jede der beiden Stelleinheiten für sich allein die ihr zugeführte Eingangsspannung von $\pm \Delta U_P/2$ ändern. Befindet sich jede der beiden Stelleinheiten in ihrem ersten Schaltzustand, so wird dies als erste Schaltzustands-Kombination des Stelleinheiten-Paares bezeichnet und es gilt für die Ausgangsspannung des Stelleinheiten-Paares

$$U_{AP1} = U_{EP} + \Delta U_P \quad (11)$$

wenn U_{EP} die Eingangsspannung des Stelleinheiten-Paares ist.

Befindet sich jede der beiden Stelleinheiten in ihrem zweiten Schaltzustand, so wird dies als zweite Schaltzustands-Kombination des Stelleinheiten-Paares bezeichnet, und es gilt

$$U_{AP2} = U_{EP} - \Delta U_P \quad (12)$$

Weiterhin sind die Windungsverhältnisse der beiden Transformatoren so aufeinander abgestimmt, daß die Wirkungen der beiden Stelleinheiten einander kompensieren, wenn sich das Stelleinheiten-Paar in einer dritten Schaltzustands-Kombination befindet; in dieser dritten Schaltzustands-Kombination befindet sich beispielsweise die erste, näher an der Versorgungsspannungsquelle liegende Stelleinheit im ersten und die zweite Stelleinheit im zweiten Schaltzustand. Es gilt dann für die Ausgangsspannung des Stelleinheiten-Paares

$$\begin{aligned} U_{AP3} &= U_{EP} + \frac{1}{2} \Delta U_P - \frac{1}{2} \Delta U_P = \\ &= U_{EP} \end{aligned} \quad (13)$$

Dabei ist von großem Vorteil, daß in allen drei Schaltzustands-Kombinationen die Verluste, die in den Stelleinheiten auftreten, extrem gering sind. Insbesondere erfolgt auch die unveränderte Weitergabe der Eingangsspannung auf den Ausgang des Stelleinheiten-Paares in der dritten Schaltzustands-Kombination praktisch verlustfrei.

Im Vergleich zu einer Stelleinheit, die für sich allein die drei den Gleichungen (4), (5) und (8) entsprechenden Schaltzustände annehmen kann, besitzt ein solches Stelleinheiten-Paar den Vorteil, daß von jeder einzelnen Stelleinheit nur die Hälfte der für die betreffende Stufe vorgesehenen Spannungs- bzw. Leistungsänderung aufgebracht werden muß. Es werden zwar zwei Transformatoren benötigt, doch können diese der halben Leistung entsprechend auch erheblich kleiner und leichter dimensioniert werden. Dies ist insbesondere bei der Herstellung, dem Transport sowie bei der Ersatzteilhaltung von Transformatorschaltungen für große Leistungen von Vorteil.

Im allgemeinen bleibt für ein Stelleinheiten-Paar die vierte Schaltzustands-Kombination ungenutzt, bei der sich die erste Stelleinheit im zweiten Schaltzustand und die zweite Stelleinheit im ersten Schaltzustand befindet. Die eben gemachten Angaben lassen sich in folgender Tabelle 1 zusammenfassen:

Tabelle 1

Schaltzustands-Kombination	Stelleinheit 1	Stelleinheit 2	Ausgangs- spannung
1	+	+	$U_{A1} = U_E + \Delta U_P$
2	-	-	$U_{A2} = U_E - \Delta U_P$
3	+	-	$U_{A3} = U_E$

Grundsätzlich ist es hier also nicht erforderlich, daß jede der beiden Stelleinheiten des Stelleinheiten-Paares für sich allein in den dritten Schaltzustand gebracht werden kann.

Vorzugsweise wird jedoch auch bei einem Stelleinheiten-Paar jede der beiden Stelleinheiten so ausgebildet, daß die eine weitere Wicklung oder beide weiteren Wicklungen zur ersten Wicklung parallelgeschaltet werden können, jede der beiden Stelleinheiten also für sich allein in den dritten Schaltzustand gebracht werden kann; sieht man dabei in jeder Stelleinheit die oben erwähnte Strombegrenzungsschaltung bzw. Strombegrenzungsschaltungen

vor, so läßt sich mit Hilfe von V-MOS-Transistor-Schaltern ein außerordentlich schnelles, in mehreren Teilschritten erfolgendes Umschalten von jeder Schaltzustands-Kombination des Stelleinheiten-Paares in jede andere Schaltzustands-Kombination durchführen.

Soll z.B. das Stelleinheiten-Paar aus der zweiten Schaltzustands-Kombination ($U_{AP2} = U_{EP} - \Delta U_P$) in die dritte Schaltzustands-Kombination ($U_{AP3} = U_{EP}$) gebracht werden, so kann dies bei einem solchen Stelleinheiten-Paar ohne Verzögerung dadurch geschehen, daß in beiden Stelleinheiten der Schalter geschlossen wird, durch dessen Schließen die Stelleinheit für sich allein in ihren dritten Schaltzustand gebracht wird, wie dies oben beschrieben wurde. Dadurch ergibt sich eine weitere Schaltzustands-Kombination, die hinsichtlich der Ausgangsspannung U_{AP} des Stelleinheiten-Paares mit der oben beschriebenen dritten Schaltzustands-Kombination äquivalent ist. Es gilt also auch hier $U_{AP3}' = U_{EP}$. Diese Änderung der Ausgangsspannung um ΔU_P kann zu beliebigen Zeitpunkten erfolgen und die Ausgangsspannung geht praktisch unverzögert vom alten Spannungswert U_{AP2} auf den neuen Spannungswert U_{AP3}' über.

Entsprechendes gilt für einen Übergang des Stelleinheiten-Paares aus der ersten Schaltzustands-Kombination ($U_{AP1} = U_{EP} + \Delta U_P$) in die weitere Schaltzustands-Kombination.

Allerdings ist es zweckmäßig, das Stelleinheiten-Paar dann, wenn die Ausgangsspannung U_{AP} längere Zeit gleich der Eingangsspannung U_{EP} bleiben soll, aus dieser weiteren Schaltzustands-Kombination in die oben beschriebene dritte Schaltzustands-Kombination umzuschalten. Dies erfolgt zu den jeweils günstigen Zeitpunkten dadurch, daß

durch das Öffnen der entsprechenden Schalter die erste Stelleinheit in ihren ersten Schaltzustand und die zweite Stelleinheit in ihren zweiten Schaltzustand gebracht wird. Die Ausgangsspannung des Stelleinheiten-Paares geht dabei von $U_{AP3}' = U_{EP}$ auf $U_{AP3} = U_{EP}$ über, ändert sich also praktisch nicht.

Die dritte Schaltzustands-Kombination hat gegenüber der weiteren Schaltzustands-Kombination den Vorteil, daß aus ihr heraus erforderlichenfalls ein Übergang in die erste oder die zweite Schaltzustands-Kombination in zwei gleich großen Änderungsschritten erfolgen kann, von denen der erste ohne jede Verzögerung dadurch durchführbar ist, daß durch Schließen des betreffenden Schalters die zweite oder die erste Stelleinheit in ihren dritten Schaltzustand gebracht wird. Dadurch geht die Ausgangsspannung des Stelleinheiten-Paares augenblicklich von $U_{AP3} = U_E$ auf $U_E + \Delta U_P/2$ oder $U_E - \Delta U_P/2$ über. Zum nächsten günstigen Zeitpunkt, der spätestens innerhalb der nächsten Halbperiode der Wechselspannung eintritt, wird dann die zweite oder die erste Stelleinheit aus dem dritten in den ersten oder den zweiten Schaltzustand gebracht, wodurch das Stelleinheiten-Paar in die erste bzw. zweite Schaltzustands-Kombination übergeht, in der $U_{AP1} = U_E + \Delta U_P/2 + \Delta U_P/2$ bzw. $U_{AP2} = U_E - \Delta U_P/2 - \Delta U_P/2$ gilt.

Der Übergang von der ersten in die zweite oder von der zweiten in die erste Schaltzustands-Kombination erfolgt ebenfalls in zwei Schritten, von denen der erste sofort und der zweite spätestens innerhalb der nächsten Halbperiode der Wechselspannung durchgeführt werden kann. In diesem Fall besteht der erste Schritt darin, daß beide Stelleinheiten gleichzeitig durch Schließen der entsprechenden Schalter in ihren dritten Schaltzustand gebracht werden; im zweiten Schritt werden dann die bei-

den Stelleinheiten durch Öffnen der entsprechenden Schalter jeweils in ihren zweiten bzw. ihren ersten Schaltzustand übergeführt.

Wird eine aus einem oder mehreren solcher Stelleinheiten-Paare (die dann unterschiedliche Spannungsänderungen bewirken können) bestehende Transformator-Schaltung als Spannungsregler oder Spannungskonstanter eingesetzt, so lassen sich mit ihr auch die extrem hohen Anforderungen hinsichtlich der Schaltgeschwindigkeit und Schaltgenauigkeit erfüllen, wie sie beispielsweise bei der Stromversorgung von Datenverarbeitungsanlagen gestellt werden.

Um einen größeren Bereich von Ausgangsspannungswerten in kleinen Spannungsschritten überdecken zu können, ist es vorteilhaft, mehrere Stufen, die entweder aus einzelnen Stelleinheiten die jeweils für sich in den dritten Schaltzustand gebracht werden können oder aus den oben beschriebenen Stelleinheiten-Paaren bestehen

(wobei in einer Anordnung auch beide Arten gemischt werden können), seriell hintereinander zu schalten und die Spannungsdifferenzen $\pm \Delta U_1, \dots, \pm \Delta U_n$, die n solcher Stufen erzeugen können, voneinander verschieden zu wählen. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Prozentwerte, die sich ergeben, wenn man jede dieser Spannungsdifferenzen durch die durch 100 geteilte Versorgungsspannung dividiert, zueinander im Verhältnis ganzzahliger Dreierpotenzen stehen. Gilt also für die kleinste, durch eine der Stufen erzeugbare Spannungsdifferenz $\pm \Delta U_{\min}$:

$$\frac{\pm \Delta U_{\min}}{U_V} \cdot 100 = A \%$$

so werden die Spannungsdifferenzen der anderen Stufen so gewählt, daß sie in etwa gleich $\pm 3A\%$, $\pm 9A\%$ usw. der Versorgungsspannung U_V sind.

Sind beispielsweise in einer Transformatorschaltung drei Stufen hintereinander geschaltet, und werden für jede Stufe die drei oben genannten Schaltzustände bzw. Schaltzustands-Kombinationen verwendet, so sind für die gesamte Transformatorschaltung siebenundzwanzig Kombinationen von Schaltzuständen möglich, von denen eine die von der Spannungsquelle abgegebene Versorgungsspannung mit nahezu unveränderter Amplitude an die Last gelangen läßt, während dreizehn Kombinationen die Amplitude der Versorgungsspannung in etwa um ganzzahlige Vielfache von $A\%$ erhöhen und dreizehn Kombinationen diese Amplitude in etwa um ganzzahlige Vielfache von $A\%$ erniedrigen. Dies ist in Tabelle 2 genauer dargestellt.

In dieser Tabelle ist in der linken Spalte die laufende Nummer n der jeweiligen Kombination von Schaltzuständen wiedergegeben, wobei durch das hochgestellte Vorzeichen "+" oder "-" angedeutet wird, ob es sich um eine Kombination handelt, die zu einer Vergrößerung ("+") der Amplitude der Versorgungsspannung führt oder um eine Kombination, die die Versorgungsspannung erniedrigt ("-").

Tabelle 2

Kombination n	Schaltzustand der Stufen mit einer Ände- rung um			aufgeprägte Amplituden- Änderung in %
	9A %	3A %	A %	
0	0	0	0	0
1 ⁺	0	0	+	+ 1A
2 ⁺	0	+	-	+ 2A
3 ⁺	0	+	0	+ 3A
4 ⁺	0	+	+	+ 4A
5 ⁺	+	-	-	+ 5A
6 ⁺	+	-	0	+ 6A
7 ⁺	+	-	+	+ 7A
8 ⁺	+	0	-	+ 8A
9 ⁺	+	0	0	+ 9A
10 ⁺	+	0	+	+10A
11 ⁺	+	+	-	+11A
12 ⁺	+	+	0	+12A
13 ⁺	+	+	+	+13A
1 ⁻	0	0	-	- 1A
2 ⁻	0	-	+	- 2A
3 ⁻	0	-	0	- 3A
4 ⁻	0	-	-	- 4A
5 ⁻	-	+	+	- 5A
6 ⁻	-	+	0	- 6A
7 ⁻	-	+	-	- 7A
8 ⁻	-	0	+	- 8A
9 ⁻	-	0	0	- 9A
10 ⁻	-	0	-	-10A
11 ⁻	-	-	+	-11A
12 ⁻	-	-	0	-12A
13 ⁻	-	-	-	-13A

In der mittleren Spalte bedeutet ein "+", daß sich in der betreffenden Stufe die eine Stelleinheit bzw. beide Stelleinheiten eines Paares im ersten Schaltzustand befinden, so daß die Amplitude der Versorgungsspannung um 9A%, 3A% oder A% vergrößert wird, während ein "-" eine entsprechende Verkleinerung bedeutet und "0" den dritten Schaltzustand einer einzelnen Stelleinheit bzw. die Schaltzustands-Kombination 3 (siehe Tabelle 1) des betreffenden Stelleinheiten-Paares symbolisiert, in dem bzw. in der die Amplitude der Eingangs-Wechselspannung unverändert weitergegeben wird. In der rechten Spalte sind die durch die jeweilige Kombination der Schaltzustände aller Stufen erzielbaren Gesamtänderungen der Amplitude wiedergegeben. Dabei sind nur gerundete Werte angegeben, die nicht berücksichtigen, daß sich die Eingangsspannung der näher bei der Last angeordneten Stufen in Abhängigkeit vom Schaltzustand der vorausgehenden Stufen ändern kann.

Man sieht, daß die Amplitudenänderung mit Hilfe einer solchen erfindungsgemäßen Transformatorschaltung in diskreten Schritten erfolgt, wobei die Schrittweite von einer Schaltzustands-Kombination zur nächsten immer in etwa gleich A% der jeweiligen Versorgungsspannung ist.

Ist eine Stufe aus zwei Stelleinheiten aufgebaut, die ein Paar bilden, so können alternativ zu der eben erläuterten Anordnung auch von jedem Stelleinheiten-Paar nur zwei Schaltzustands-

Kombinationen Verwendung finden, beispielsweise die Schaltzustands-Kombination 0, in der die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung ist, und die Kombination "-", in der die Ausgangsspannung um $n \cdot A\%$ niedriger als die Eingangsspannung ist, wobei n für jedes Stelleinheiten-Paar einen anderen ganzzahligen Wert annimmt. Für diesen Verwendungsfall ist es möglich, die Stelleinheiten-Paare so zu konstruieren, daß sie nur diese beiden Schaltzustands-Kombinationen einnehmen können. Dies kann in der Weise geschehen, daß z.B. die vordere Stelleinheit eines jeden Paares eine fest verdrahtete, nicht schaltbare weitere Wicklung aufweist, die permanent beispielsweise eine negativ aufgeprägte Spannung $-(n/2) \cdot A\%$ induziert, während die zweite Stelleinheit eine addierende und eine subtrahierende weitere Wicklung besitzt, die alternativ so geschaltet werden können, daß sie entweder eine Spannung von $+(n/2) \cdot A\%$ oder von $-(n/2) \cdot A\%$ induzieren, was in Verbindung mit der induzierten Spannung $-(n/2) \cdot A\%$ der vorderen Stelleinheit entweder eine Spannungsänderung 0 oder $-n \cdot A\%$ ergibt. Entsprechend können auch Stelleinheiten-Paare vorgesehen werden, die nur die beiden Schaltzustands-Kombinationen 0 und $+n \cdot A\%$ annehmen können.

In allen diesen Fällen erfolgt die Änderung der Ausgangsspannung der gesamten Transformatorschaltung gegenüber der Eingangsspannung nicht nach dem in Tabelle 2 wiedergegebenen Ternär-Kode sondern nach einem Binär-Kode. Zwar werden hier zur Überdeckung desselben Spannungsänderungsbereiches mehr Stelleinheiten-Paare als beim Ternär-Kode benötigt; es gibt jedoch Anwendungsfälle, in denen ohnehin die Eingangsspannung ausgehend von einer Gesamtänderung 0 nur in einer Richtung verändert werden soll und/oder der Spannungsänderungsbereich nicht groß ist. Dann kann der

Vorteil einer rein binären Ansteuerung den erhöhten Bedarf an Stelleinheiten unter Umständen überwiegen.

Unabhängig davon, wieviele Stufen hintereinander geschaltet werden und ob ein Binär- oder ein Ternär- oder ein anderer Kode Verwendung findet, ist es ein hervorstechendes Merkmal einer derart aufgebauten erfindungsgemäßen Transformatorschaltung, daß sie eine stufenweise bzw. digitale Beeinflussung auch von sehr großen Leistungen erlaubt. Im Gegensatz zu analog arbeitenden Systemen besitzt sie eine außerordentlich hohe Regel- bzw. Steuerungsgeschwindigkeit. Die jeweils erzielte Genauigkeit hängt dabei im wesentlichen nur von der Zahl der verwendeten Stelleinheiten bzw. Stufen ab.

Der typische und bevorzugte Anwendungsfall einer aus zwei, drei oder mehr Stufen bestehenden erfindungsgemäßen Transformatorschaltung besteht jedoch nicht darin, daß ausgehend von einer festen, von einer Spannungsquelle stammenden Versorgungsspannung neun, siebenundzwanzig oder mehr Ausgangsspannungen nacheinander wahlweise erzeugbar sein sollen.

Vielmehr ist in einem besonders bevorzugten Anwendungsfall der Einsatz einer solchen Transformatorschaltung als Spannungskonstanter und/oder Spannungsregler vorgesehen. Das bedeutet, daß als Sollwert S_L für die der Last zugeführte Spannung entweder der Nennwert der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung U_V oder ein anderer Spannungswert gewählt werden können. Allerdings muß ein solcher anderer Sollwert innerhalb des Änderungsbereichs der erfindungsgemäßen Transformatorschaltung liegen. Liegt er sehr nahe an der Grenze dieses Änderungsbereichs, so ist eine Regelung der Lastspannung U_L nur bei Abweichungen vom Sollwert S_L in einer Richtung

möglich. Dies ist aber in Fällen, in denen Abweichungen in der anderen Richtung nicht auftreten, völlig ausreichend.

Im folgenden wird die Anwendung als symmetrischer Spannungsregler genauer erläutert, mit dessen Hilfe verhindert wird, daß die Amplitude der einer Last zugeführten Lastspannung von einem vorgegebenen Sollwert S_L um mehr als $\pm \delta\%$ abweicht, der gleich dem Nennwert der Versorgungsspannung U_V ist, die in einem wesentlich größeren Bereich, beispielsweise um maximal $\pm \Delta\%$ des Nennwertes schwanken kann.

Zu diesem Zweck umfaßt eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung neben einer Transformatorschaltung mit entsprechend vielen Stufen eine Meßfühleranordnung, die die Amplitude der Versorgungsspannung und/oder die Amplitude der Lastspannung mißt, eine Komparatoranordnung, die das oder die Meßfühlersignale mit einem oder mehreren Referenzwerten vergleicht und bei Abweichungen entsprechende Differenzsignale erzeugt, sowie eine Schaltersteuerung, die diese Differenzsignale beispielsweise mit einer fest einprogrammierten Tabelle von Differenzsignalwerten vergleicht. Aus diesem Vergleich ermittelt die Schaltersteuerung diejenige Kombination n^+ oder n^- von Schaltzuständen (siehe Tabelle 2), die für eine Kompensation der aufgetretenen Abweichung der Versorgungsspannung vom Nennwert erforderlich ist, so daß die Lastspannung innerhalb des vorgegebenen Bereiches $S_L \pm \delta\%$ bleibt.

Es sei nun angenommen, daß die Amplitude der Versorgungsspannung zunächst dem Nennwert und damit auch dem Sollwert S_L entspricht, dann aber im Laufe der Zeit von diesem Nennwert in zunehmendem

Maße beispielsweise nach oben abweicht: In diesem Fall muß die Schaltersteuerung von der zunächst vorhandenen Schaltzustands-Kombination $n = 0$ (siehe Tabelle 2), bei der die Lastspannung U_L gleich der Versorgungsspannung U_V ist, rechtzeitig zur Schaltzustands-Kombination $n = 1^-$, bei weiterem Ansteigen zur Kombination $n = 2^-$ usw. übergehen. Dadurch wird ein entsprechendes ganzzahliges Vielfaches von A % von der Versorgungsspannung subtrahiert und somit die Lastspannung im gewünschten Bereich $S_{L+} \pm \delta$ % gehalten.

Bei stetig zunehmender positiver Abweichung erfolgt der Übergang von der n^- -ten Kombination zur $(n+1)^-$ -ten Kombination jeweils bei einer bestimmten Schaltschwelle $SW_{n^-/(n+1)^-}$, d.h. einem festgelegten Amplitudenwert der Versorgungsspannung. Nimmt die positive Abweichung wieder stetig ab, so erfolgt in etwa bei derselben Schaltschwelle in umgekehrter Richtung der Übergang von der $(n+1)^-$ -ten Kombination zur n^- -ten Kombination von Schaltzuständen. Es ist vorteilhaft, die beiden zuletzt genannten Schaltschwellen durch eine kleine Spannungsdifferenz voneinander zu trennen. Durch die so erzielte "Hysteresis" wird ein zu häufiges Schaltspiel in den Fällen verhindert, in denen die Versorgungsspannung U_V längere Zeit einen Wert besitzt, der gleich einer Schaltschwelle ist, und um diesen Wert geringfügig schwankt.

Entsprechendes gilt auch für negative Abweichungen der Amplitude der Versorgungsspannung vom Nennwert nur daß hier die Schaltschwellen mit $SW_{n^+/(n+1)^+}$ bezeichnet werden, weil in diesem Fall bei zunehmender Abweichung nach unten von der additiven Aufprägung des n -fachen der minimalen Amplitudenänderung A % zur additiven Aufprägung des $(n+1)$ -fachen von A % über-

gegangen werden muß, um die gewünschte Konstanz der Amplitude der Lastspannung zu erzielen.

Bei jedem Übergang von einer Kombination von Schaltzuständen zu einer benachbarten Kombination ändert sich die Amplitude der Lastspannung sprunghaft etwa um A %. Vorzugsweise werden die Schaltschwellen so festgelegt, daß dann, wenn die Amplitude der Versorgungsspannung den Wert der betreffenden Schaltschwelle ohne sprunghafte Änderung durchläuft, die Amplitudenwerte U_{Lvor} und U_{Lnach} symmetrisch zum Sollwert liegen. Dabei ist U_{Lvor} die Amplitude der Lastspannung vor dem Umschaltvorgang und U_{Lnach} die Amplitude der Lastspannung nach dem Umschaltvorgang. Es soll also mit möglichst guter Näherung gelten:

$$|S_L - U_{Lvor}| = |S_L - U_{Lnach}| \quad (14)$$

weiterhin gilt $|U_{Lvor} - U_{Lnach}| = \frac{A \cdot S}{100}$. Der Prozentwert A ist zwar konstant, ist aber nicht auf den Sollwert S_L sondern auf die Amplitude der Eingangsspannung der jeweiligen Stufe bezogen. Somit ist die Größe von U_{Lvor} und U_{Lnach} davon abhängig, von welcher Kombination von Schaltzuständen ein Übergang zu einer benachbarten Kombination erfolgt.

Die obige Gleichung (14) kann durch geeignete Wahl der Schaltschwellen SW in jedem Fall eingehalten werden. Auch ist es erfindungsgemäß möglich, durch eine entsprechende Wahl von A sicherzustellen, daß U_{Lvor} und U_{Lnach} innerhalb des durch die gewünschte Regelgenauigkeit $S_L \pm \delta$ % vorgegebenen Amplitudenbereiches liegen, wobei der Prozentwert auf den Sollwert $S_L = 100$ % bezogen ist.

Bei der Festlegung des Wertes von A ist zu berücksichtigen, daß einerseits A möglichst groß sein sollte, damit möglichst wenig Stelleinheiten zur Abdeckung eines gegebenen Schwankungsbereiches Δ erforderlich sind, daß aber andererseits A nicht zu groß gewählt werden darf, weil sonst die gewünschte Regelgenauigkeit δ nicht eingehalten werden kann. Erfindungsgemäß wird A vorzugsweise so gewählt, daß es zwischen $1,6 \cdot \delta$ und $1,8 \cdot \delta$ liegt.

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß die Schaltschwellen unabhängig davon verwendet werden können, ob die Schaltungsanordnung als Spannungskonstanter oder als Spannungsregler arbeitet, ob also die Lastspannung U_L auf einem Sollwert S_L gehalten wird, der gleich dem Nennwert der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung ist, oder auf einem Sollwert, der sich von diesem Nennwert unterscheidet.

Auch ist die Verwendung dieser Schaltschwellen unabhängig davon, ob mit der Meßfühleranordnung die Versorgungsspannung oder die Lastspannung gemessen wird. Im ersten Fall kann die Differenz der obigen Schaltschwellen zum Sollwert S_L unmittelbar in der von der Schaltersteuerung benutzten Tabelle enthalten sein, mit welcher das vom Komparator gelieferte Differenzsignal verglichen wird. Im zweiten Fall muß die Schaltersteuerung aus der Annäherung der Amplitude der Lastspannung an einen der Werte U_{Lvor} und U_{Lnach} und/oder der Kenntnis der momentan gültigen Kombination von Schaltzuständen ermitteln, an welche Schaltschwelle sich die Versorgungsspannung gerade annähert und welche Umschaltung daher vorgenommen werden muß.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, daß die Meßfühleranordnung die Amplitude der Wechselspannungen vor und hinter der Transformatorschaltung mißt. Es werden dann also die Änderungen sowohl der Versorgungsspannung U_V als auch der Lastspannung U_L erfaßt und so ausgewertet, daß die Schalter der Stelleinheiten so gesteuert werden, daß sich eine möglichst gute Konstanz der Amplitude der der Last zugeführten Spannung ergibt.

Vorteilhafterweise kann eine erfindungsgemäße Transformatorschaltung bei Mehrphasensystemen mit oder ohne Null-Leiter eingesetzt werden. Im ersten Fall ist für jede Phase wenigstens eine Stelleinheit vorgesehen, deren erste Wicklung jeweils so in dem betreffenden Phasenleiter liegt, daß sie von dem auf diesem Phasenleiter fließenden Laststrom durchflossen wird, während der Anschluß-Verbindungsleiter einer jeden Stelleinheit mit dem Null-Leiter des Mehrphasensystems verbunden ist.

Weist das Mehrphasensystem keinen von der Spannungsquelle zum Verbrauch führenden Null-Leiter auf, so werden die ersten Wicklungen der Stelleinheiten, die für eine bestimmte Phase vorgesehen sind, wieder in den Phasenleiter geschaltet und es werden sämtliche Anschluß-Verbindungsleiter miteinander verbunden, wodurch ein künstlicher Null-Leiter gebildet wird, der auf einem beliebigen Potential liegen kann.

Schließlich können bei einem Mehrphasensystem ohne Nullleiter die für die verschiedenen Phasen vorgesehenen Stelleinheiten in einer verketteten Schaltung angeordnet werden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben; in dieser zeigt:

- Fig. 1 eine Transformatorschaltung, bei der zwischen Spannungsquelle und Last eine Stelleinheit angeordnet ist, die gemäß einer ersten Ausführungsform einen Transformator mit einer einzigen, kurzschließbaren weiteren Wicklung besitzt,
- Fig. 2 eine Transformatorschaltung, bei der zwischen Spannungsquelle und Last eine Stelleinheit angeordnet ist, die gemäß einer zweiten Ausführungsform einen Transformator mit zwei jeweils kurzschließbaren weiteren Wicklungen besitzt,
- Fig. 3 einen Ausschnitt aus Fig. 2, der die Einzelheiten einer Sensoreinheit wiedergibt,
- Fig. 4 zwei miteinander in Reihe geschaltete Stelleinheiten, die ein Stelleinheiten-Paar bilden und von denen jede gemäß einer dritten Ausführungsform einen Transformator mit zwei nicht kurzschließbaren weiteren Wicklungen besitzt,
- Fig. 5 eine als einphasiger Spannungskonstanter aufgebaute Transformatorschaltung mit drei in Reihe geschalteten Stufen,
- Fig. 6 eine weitere Ausführungsform eines Spannungskonstanters für ein 3-Phasen-System,
- Fig. 7 eine Ausführungsform, bei der eine einzige Stelleinheit in eine Vielzahl von Schaltzuständen gebracht werden kann und als Spannungsregler Verwendung findet,
- Fig. 8 eine weitere Ausführungsform einer Stelleinheit für eine Transformatorschaltung gemäß

der Erfindung, bei der der Transformator nur eine einzige weitere Wicklung aufweist, die zur ersten Wicklung parallelgeschaltet werden kann,

Fig. 9 eine Ausführungsform einer Stelleinheit für eine Transformatorschaltung gemäß der Erfindung, bei der der Transformator zwei weitere Wicklungen umfaßt, die miteinander in Reihe zur ersten Wicklung parallelgeschaltet werden können,

Fig. 10 den Aufbau einer Strombegrenzungsschaltung, wie sie bei den in den Fig. 8 und 9 wiedergegebenen Stelleinheiten Verwendung findet, und

Fig. 11 ein Diagramm zur Erläuterung der Wahl der günstigsten Schaltzeitpunkte beim Übergang von einem Schaltzustand in einen anderen.

Fig. 1 zeigt eine Wechselspannungsquelle 1, die eine Versorgungsspannung U_V abgibt, die den Eingangsanschlüssen 2, 3 einer Stelleinheit 4 als Eingangsspannung U_E zugeführt wird. An den Ausgangsanschlüssen 5, 6 der Stelleinheit 4 erscheint eine Ausgangsspannung U_A , die einer Last 7 als Lastspannung U_L zugeführt wird.

Mit Hilfe der erfindungsgemäßen Stelleinheit 4 ist die Amplitude der Ausgangsspannung U_A gegenüber der Amplitude der Eingangsspannung U_E veränderbar. Zu diesem Zweck umfaßt die Stelleinheit 4 einen Transformator 8, dessen erste Wicklung 9 zwischen den Eingangsanschluß 2 und den Ausgangsanschluß 5 geschaltet ist, während der Eingangsanschluß 3 mit dem Ausgangsanschluß 6 mittels des Anschluß-Verbindungsleiters 10 direkt galvanisch leitend verbunden ist. Auf diese Weise ist von der Spannungsquelle 1 her gesehen die erste Wicklung 9 mit der Last 7 in Reihe geschaltet.

Der Transformator 8 besitzt eine weitere Wicklung 11, die über den Eisenkern 12 des Transformators 8 mit dessen erster Wicklung 9 magnetisch gekoppelt ist. Mit den beiden Enden 13, 14 der weiteren Wicklung 11 sind zwei Schalterpaare 15, 16 sowie ein Kurzschlußschalter 17 verbunden.

Mit Hilfe der beiden Schalterpaare 15, 16 und des Kurzschlußschalters 17 kann die Stelleinheit 4 in vier verschiedene Schaltzustände gebracht werden. Im ersten Schaltzustand, in welchem das Schalterpaar 15 geschlossen ist und die Schalter 16, 17 geöffnet sind wird an die weitere Wicklung 11 die Eingangsspannung U_E angelegt. Der durch die Punkte 19, 20 definierte Wicklungssinn der Wicklungen 9, 11 ist dabei so gewählt, daß sich die Spannung ΔU_1 , die in diesem ersten Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 in der ersten Wicklung 9

induziert wird, zur Eingangsspannung U_E addiert.
Zwischen den Ausgangsanschlüssen 5, 6 der Stelleinheit erhält man also die Spannung

$$U_{A1} = U_E + \Delta U_1$$

Wie bereits erwähnt, ist dabei der Wert, d.h. der Amplituden-Absolutbetrag der induzierten Spannung ΔU_1 durch das Windungsverhältnis w_1/w_w der ersten Wicklung 9 zur weiteren Wicklung 11 nach der Gleichung $\Delta U_1 = w_1 U_E / w_w$ festgelegt.

Im zweiten Schaltzustand, der in Fig. 1 dargestellt ist, sind die Schalter 15 und 17 geöffnet und ist das Schalterpaar 16 geschlossen, wodurch an die weitere Wicklung 11 die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 4 gelegt wird. Gleichzeitig ist der Wicklungssinn der weiteren Wicklung 11 gegenüber dem ersten Schaltzustand umgekehrt. Dadurch subtrahiert sich die Spannung ΔU_2 , die in diesem Schaltzustand in der ersten Wicklung 9 des Transformators 8 induziert wird, von der Eingangsspannung U_E , so daß man am Ausgang 5, 6 erhält:

$$U_{A2} = U_E - \Delta U_2$$

Für die induzierte Spannung gilt in diesem Fall $\Delta U_2 = w_1 U_E / (w_w + w_1)$. Da das Windungsverhältnis der ersten Wicklung 9 zur weiteren Wicklung 11 erfindungsgemäß typischerweise kleiner 1 : 7 ist, ist also die im zweiten Schaltzustand induzierte Spannung ΔU_2 immer etwas kleiner als die im ersten Schaltzustand induzierte Spannung ΔU_1 . Allerdings kann in der Praxis die mit der Schaltungsanordnung nach Fig. 1 im ersten Schaltzustand erzielbare Vergrößerung der Ausgangsspannung U_A gegenüber der Eingangsspannung U_E mit sehr guter Genauigkeit gleich der im zweiten Schaltzustand erzielbaren

Spannungsverringerung gesetzt werden, da die erste Wicklung 9 für den von der Spannungsquelle 1 zur Last 7 fließenden Laststrom einen komplexen Widerstand darstellt. Da die erste Wicklung 9 im allgemeinen nur sehr wenige Windungen umfaßt, ist dieser Widerstand zwar gering, doch führt er zu einem gewissen Spannungsabfall, der vom Schaltzustand der Stelleinheit 4 unabhängig ist. Der Wert von U_A liegt also in beiden Schaltzuständen etwas unter den Werten, die sich aus den obigen vereinfachten Gleichungen ergeben. Die in den beiden Schaltzuständen erzielbaren Ausgangsspannungen liegen daher mit guter Genauigkeit symmetrisch zur Eingangsspannung:

$$U_{A1,2} = U_E \pm \Delta U$$

In einem dritten Schaltzustand der Stelleinheit 4 sind die beiden Schalterpaare 15, 16 geöffnet und ist der Kurzschlußschalter 17 geschlossen. Der aus der somit kurzgeschlossenen weiteren Wicklung 11 bestehende Stromkreis besitzt einen sehr kleinen Widerstand, der aufgrund der Tatsache, daß das Windungsverhältnis w_1/w_w wesentlich kleiner als 1 ist, auf der Seite der ersten Wicklung 9 entsprechend heruntertransformiert erscheint. Dadurch stellt die erste Wicklung 9 in diesem Schaltzustand für den Laststrom einen äußerst kleinen Widerstand dar, an dem praktisch keine Spannung abfällt, so daß hier mit sehr guter Näherung gilt:

$$\Delta U_3 = 0$$

oder

$$U_{A3} = U_E$$

Wegen des äußerst geringen Spannungsabfalls an der ersten Wicklung 9 wird auch in der weiteren Wicklung 11 nur eine geringe Spannung induziert, so daß trotz des Kurzschlusses nur ein verhältnismäßig kleiner Kurzschlußstrom durch die weitere Wicklung 11 fließt. Die hierbei auftretenden Verluste können weit kleiner als 1% der an die Last 7 abgegebenen Leistung gehalten werden.

Da auch in den beiden ersten Schaltzuständen die in der Stelleinheit 4 auftretenden Verluste weit unter 1% der Lastleistung liegen, bildet eine solche Transformatorschaltung eine außerordentlich vorteilhafte Möglichkeit, ausgehend von einer gegebenen Eingangsspannung U_E digital drei verschiedene Ausgangsspannungen U_A zur Verfügung zu stellen.

In einem vierten Schaltzustand sind alle Schalter 15, 16, 17 geöffnet. Der Stromkreis der weiteren Wicklung 11 besitzt dann einen nahezu unendlich hohen Widerstandswert, der auch nach Heruntertransformation auf der Seite der ersten Wicklung 9 einen hohen Widerstandswert liefert, so daß an der ersten Wicklung ein von der Größe des Laststroms abhängiger Spannungsabfall auftritt. Diese Drosselwirkung der ersten Wicklung 9 im vierten Schaltzustand kann dazu verwendet werden, beim Auftreten eines Kurzschlusses an der Last die der Last zugeführte Leistung zumindest so lange auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen, bis weitere Abschaltmaßnahmen getroffen worden sind.

Die beiden Schalterpaare 15 und 16 sowie der Kurzschlußschalter¹⁷ werden durch eine Schaltersteuerung 23 betätigt, die über die Leitungen 25, 26 und 27 die Schalter 15, 16 und 17, die beispielsweise von Triacs gebildet sein können,

in der erforderlichen Weise ansteuert. Dabei wird dafür gesorgt, daß die Schalter 15, 16 und 17 niemals gleichzeitig geschlossen sind und andererseits die Zeiträume, in denen von einem Schaltzustand in einen anderen Übergang wird, möglichst kurz gehalten werden. Bei einem Übergang vom ersten oder zweiten Schaltzustand in den dritten oder umgekehrt müssen die Schalterpaare 15 bzw. 16 kurz vor dem Zeitpunkt geöffnet bzw. kurz nach dem Zeitpunkt geschlossen werden, in denen der Kurzschlußschalter 17 geschlossen bzw. geöffnet wird. Bei einem Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand ist ein nahezu gleichzeitiges Schließen und Öffnen der Schalter nicht günstig, wie weiter unten genauer erläutert wird. Vielmehr wird zwischen dem Öffnen des bisher geschlossenen Schalterpaares und dem Schließen des bisher geöffneten Schalterpaares ein kurzer zeitlicher Abstand eingehalten.

Um zu vermeiden, daß es in diesen kurzen Umschalt-Zeitabständen aufgrund der oben beschriebenen Drosselwirkung der ersten Wicklung 9 zu einem Einbruch der Ausgangsspannung U_A kommt, besitzt bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel der Transformator 8 eine eigene Kurzschlußwicklung 28, die mit Hilfe eines Schalters 29, der zu ihr parallel liegt, kurzgeschlossen werden kann. Dieser Schalter 29 wird von der Schaltersteuerung 23 über eine Leitung 30 angesteuert und nur für diejenigen Zeiträume geschlossen, während derer beim Umschalten von einem Schaltzustand in den anderen die beiden Schalterpaare 15, 16 vorübergehend gleichzeitig geöffnet sind.

In Fig. 2 ist eine Transformatorschaltung mit einer Stelleinheit 34 dargestellt, deren Aufbau sich von dem der Stelleinheit 4 unterscheidet. Die Funktion der

Stelleinheit 34 ist aber prinzipiell die gleiche wie die der Stelleinheit 4.

Die Stelleinheit 34 umfaßt wiederum einen Transformator 8, dessen erste Wicklung 9 zwischen den Eingangsanschluß 2 und den Ausgangsanschluß 5 geschaltet ist, während der andere Eingangsanschluß 3 über den Anschluß-Verbindungsleiter 10 direkt galvanisch leitend mit dem anderen Ausgangsanschluß 6 verbunden ist.

Anders als bei der Stelleinheit 4 aus Fig. 1 besitzt im vorliegenden Fall der Transformator 8 zwei weitere Wicklungen 35, 36, von denen die eine als addierende weitere Wicklung 35 mit ihrem einen Ende fest mit dem Ende der ersten Wicklung 9 galvanisch leitend verbunden ist, das mit dem Eingangsanschluß 2 direkt galvanisch leitend verbunden ist, während das andere Ende der addierenden Wicklung 35 mit Hilfe eines Schalters 37 mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 verbunden oder von diesem getrennt werden kann. Die andere der beiden weiteren Wicklungen ist als subtrahierende weitere Wicklung 36 mit ihrem einen Ende fest und direkt galvanisch leitend mit dem Ende der ersten Wicklung 9 verbunden, das direkt galvanisch leitend mit dem Ausgangsanschluß 5 der Stelleinheit 34 verbunden ist, während das andere Ende der subtrahierenden weiteren Wicklung 36 mit Hilfe eines Schalters 38 mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 verbunden bzw. von diesem getrennt werden kann. Der Wicklungssinn der drei Wicklungen 9, 35 und 36, die über den Kern 12 magnetisch miteinander gekoppelt sind, ist durch die Punkte 19, 20 und 21 gekennzeichnet. Er ist so gewählt, daß sich die Spannung ΔU_1 , die durch die addierende Wicklung 35 bei geschlossenem Schalter 37 in der ersten Wicklung 9 induziert wird, zur Eingangsspannung U_E addiert, und daß sich die Spannung ΔU_2 , die bei geschlossenem Schalter 38 von der subtrahierenden

Wicklung 36 in der ersten Wicklung 9 induziert wird, von der Eingangsspannung U_E subtrahiert.

Parallel zu jeder der beiden weiteren Wicklungen 35, 36 ist ein Kurzschlußschalter 31, 32 angeordnet, der im geschlossenen Zustand die zugehörige weitere Wicklung 35 bzw. 36 kurzschließt. Die beiden Kurzschlußschalter 31, 32 werden über eine Leitung 33 gemeinsam so angesteuert, daß sie immer gleichzeitig geöffnet oder geschlossen sind. Die Schalter 31, 32, 37 und 38 werden so angesteuert, daß entweder nur der Schalter 37 oder nur der Schalter 38 oder nur die Schalter 31, 32 geschlossen sind. Damit kann die Stelleinheit 34 in die gleichen drei Schaltzustände gebracht werden, wie sie oben für die Stelleinheit 4 beschrieben wurden. Ebenso kann die Stelleinheit 34 durch Öffnen aller Schalter 31, 32, 37 und 38 in einen entsprechenden vierten Schaltzustand gebracht werden, der nicht als "normaler" Betriebszustand dient, aber im Fall eines Lastkurzschlusses zur Begrenzung des Last-Kurzschlußstroms eingesetzt werden kann.

Grundsätzlich würde es genügen, nur einen Kurzschlußschalter 31 oder 32 vorzusehen und zur Herstellung des dritten Schaltzustandes zu schließen. Schließt man jedoch beide weiteren Wicklungen 35, 36 kurz, so fließt in jeder der Wicklungen 35, 36 nur der halbe Kurzschlußstrom, was eine kleinere Dimensionierung ermöglicht. Ob dies den Nachteil eines zweiten Kurzschlußschalters aufwiegt, ist eine im konkreten Einzelfall zu entscheidende Optimierungsfrage.

Auf alle Fälle wird bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 2 ein Schalter weniger benötigt als beim Ausführungsbeispiel in Fig. 1, wodurch der Nachteil einer zweiten weiteren Wicklung weitgehend ausgeglichen wird.

Außerdem bietet die in Fig. 2 dargestellte Ausführungsform die Möglichkeit, ΔU_1 innerhalb gewisser Grenzen von ΔU_2 unabhängig zu wählen, so daß hier also die beiden Ausgangsspannungen $U_{A1} = U_E + \Delta U_1$ und $U_{A2} = U_E - \Delta U_2$ nicht mehr notwendigerweise symmetrisch zur Eingangsspannung U_E liegen müssen.

Auch bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel ist eine Schaltersteuerung 23 vorgesehen, die über die Leitungen 25, 26, 27 die Ansteuersignale für die Schalter 37, 38 und 31, 32 abgibt. Allerdings sind die Leitungen 25, 26, 27 nicht direkt mit den Schaltern 37, 38, 31, 32 verbunden, sondern jeweils an einen Eingang eines UND-Gatters 39, 40, 41 gelegt, dessen andere Eingänge von Sensoreinheiten 42 angesteuert werden. Jede der Sensoreinheiten 42 besitzt zwei Eingangsanschlüsse, mit deren Hilfe sie die über dem zugehörigen Schalter 37, 38 bzw. 31 abfallende Spannung abfragt. Sinn dieser Sensoreinheiten 42 und der UND-Gatter 39, 40, 41 ist es, sicherzustellen, daß jeder der beiden Schalter 37, 38 bzw. die beiden Schalter 31, 32 nur dann durch ein entsprechendes Signal der Schaltersteuerung 23 geschlossen werden können, wenn die jeweils anderen Schalter vorher geöffnet worden sind.

Ist beispielsweise so, wie es in Fig. 2 dargestellt ist, der Schalter 37 der Stelleinheit 34 geschlossen, so fällt über diesem Schalter 37 keine Spannung ab. Daher erzeugt die zugehörige Sensoreinheit 42 an ihrem Ausgang ein logisches 0-Signal, das die UND-Gatter 40, 41 blockiert und verhindert, daß von der Schaltersteuerung 23 ein Schließ-Signal an die Schalter 38 und 31, 32 gelangen kann. Diese Schalter können also erst geschlossen werden, wenn der Schalter 37 geöffnet worden ist, was die Sensoreinheit 42 dadurch anzeigt, daß sie den UND-Gattern 40, 41 eine logische 1 zuführt. Gleiches gilt umgekehrt

natürlich auch für die Abfrage des Schließzustandes der Schalter 38 bzw. 31, 32 durch die zugehörigen Sensoreinheiten 42 und eine entsprechende Blockierung bzw. Freigabe des UND-Gatters 39.

Werden als Schalter 37, 38, 31, 32 Triacs verwendet, so können diese natürlich durch die UND-Gatter 39, 40, 41 nicht unmittelbar angesteuert werden, sondern es ist zwischen dem Ausgang dieser UND-Gatter und der Gate-Elektrode des Triacs eine der üblichen Triac-Ansteuer-schaltungen vorgesehen, die in Fig. 2 der Deutlichkeit halber weggelassen ist. Die Sensorschaltungen 42 werden weiter unten unter Bezugnahme auf die Fig. 3 noch genauer beschrieben.

Soll vom ersten Schaltzustand der in Fig. 2 gezeigten Stelleinheit 34 in den zweiten oder vom zweiten Schaltzustand in den ersten übergegangen werden, so muß der bisher geschlossene Schalter 37 oder 38 geöffnet und kurze Zeit später der bisher geöffnete Schalter 38 oder 37 geschlossen werden. Dabei soll die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 34 möglichst schnell und ohne das Auftreten von zusätzlichen Spannungsspitzen oder Spannungseinbrüchen von dem alten zum neuen Amplitudenwert übergehen. Um dies zu erreichen, ist es zweckmäßig, den bisher geschlossenen Schalter 37 oder 38 zu öffnen, wenn der die zugehörige Wicklung 35 oder 36 durchfließende Strom einen Nulldurchgang aufweist. Verwendet man als Schalter 37 bzw. 38 einen Triac, so ergibt sich dieses Öffnen des Schalters zum richtigen Zeitpunkt, d.h. beim Nulldurchgang des Stromes automatisch dadurch, daß man nach der Selbstlöschung des Triacs beim Strom-Nulldurchgang ein erneutes Zünden in der anderen Richtung verhindert. Das Schließen eines bisher geöffneten Schalters 38 oder 37 erfolgt vorzugsweise bei solchen Phasenwinkeln

des die Wicklung 9 durchsetzenden Magnetflusses, bei denen die durch das Schließen des Schalters 38 bzw. 37 bewirkte Änderung dieses Magnetflusses möglichst klein ist. Der Phasenwinkel des Magnetflusses, bei dem dieses Kriterium erfüllt ist, hängt vom Laststrom ab, so daß sich für ihn kein exakter Wert, sondern nur ein Bereich angeben läßt. Für den Schalter 37 liegt dieser Bereich in der Umgebung des Nulldurchgangs des Magnetflusses, während er für den Schalter 38 in der Umgebung des Maximums des Absolutbetrags dieses Magnetflusses liegt.

Zur Ermittlung der jeweils günstigsten Schließ-Zeitpunkte für den Schalter 37 bzw. 38 besitzt der Transformator 8 eine vierte Wicklung, die als Sensor-Wicklung 43 dient. In dieser Sensorwicklung wird bei geöffneten Schaltern 37 und 38 eine Spannung induziert, die eine von der Last unabhängige, konstante Phasenverschiebung gegenüber dem Magnetfluß in der Wicklung 9 besitzt. Diese Phasenverschiebung ist konstant gleich 90° , so daß also der Schalter 37 immer im Bereich des Absolutbetrag-Maximums dieser Spannung und der Schalter 38 im Bereich eines Nulldurchgangs dieser Spannung geschlossen werden muß. Die hierfür erforderliche Information wird der Schaltersteuerung 23 von der Wicklung 43 über die Leitungen 44 zugeführt.

Anhand von Fig. 3 wird im folgenden ein Beispiel für die in Fig. 2 nur schematisch dargestellten Sensoreinheiten 42 erläutert. Dabei sind in Fig. 3 nur die beiden Verbindungsleitungen zur Stelleinheit 34 wiedergegeben, die von oben die am zugehörigen Schalter, beispielsweise am Schalter 37 abfallende Spannung zuführen, sowie die Leitung, die nach unten das Ansteuersignal für die beiden UND-Gatter der anderen Schalter, beispielsweise für die UND-Gatter 40, 41 der Schalter 38 und 31, 32 abgibt.

Die über dem Schalter 37 im geöffneten Zustand abfallende Wechselspannung wird mit Hilfe eines Gleichrichters 46 gleichgerichtet, dessen Gleichspannungsausgänge über einen Widerstand 47 und eine Fotodiode 48 eines Optokopplers 49 miteinander verbunden sind. Ein Fototransistor 50 des Optokopplers 49 ist einerseits über einen Widerstand 51 mit einer Versorgungsspannung V und andererseits unmittelbar mit Masse verbunden. Die zwischen dem Kollektor des Fototransistors 50 und dem Widerstand 51 gegenüber der Masse abgreifbare Spannung wird über eine Leitung 52 einem Inverter 53 zugeführt, dessen Ausgang mit der zu den UND-Gattern 40, 41 führenden Ausgangsleitung verbunden ist, die die Schließ-Signale, die über die Leitungen 26, 27 von der Schaltersteuerung 23 kommen, freigeben oder blockieren können.

Ist der Schalter 37 geöffnet, so erzeugt der Gleichrichter 46 aus der dann am Schalter 37 abfallenden Wechselspannung eine Gleichspannung, die die Diode 48 des Optokopplers 49 zum Leuchten bringt. Das daraufhin vom Fototransistor 50 abgegebene "low"-Signal wird vom Inverter 53 in ein "high"-Signal invertiert, das die UND-Gatter 40, 41 freigibt.

Ist dagegen der Schalter 37 geschlossen, so fällt an ihm keine Wechselspannung ab und der Gleichrichter 46 erzeugt keine Gleichspannung. Damit leuchtet die Diode 48 des Optokopplers nicht und der Fototransistor 50 gibt ein "high"-Signal ab, das vom Inverter 53 in ein "low"-Signal zum Sperren der UND-Gatter 40, 41 invertiert wird.

In Fig. 4 sind zwei Stelleinheiten 54, 54' dargestellt, die einen identischen Aufbau besitzen, der sich vom Aufbau der in Fig. 2 dargestellten Stelleinheit 34 lediglich darin unterscheidet, daß die beiden Kurzschlußschalter

31, 32 weggelassen sind. Als Folge hiervon entfällt auch das UND-Gatter 41 aus Fig. 2, das diese beiden Schalter 31, 32 ansteuert, sowie diejenige der drei Sensoreinheiten 42, die den Schaltzustand der Schalter 31, 32 abfragt. Die beiden verbleibenden UND-Gatter 39, 40 benötigen dementsprechend nur zwei statt drei Signaleingänge. Im übrigen ist der grundsätzliche Aufbau der Stelleinheiten 54, 54' gleich dem der Stelleinheit 34 und es sind die einander entsprechenden Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

Die beiden Stelleinheiten 54, 54' sind miteinander in Reihe geschaltet, d.h. die an den Ausgangsanschlüssen 5, 6 der Stelleinheit 54 erscheinende Ausgangsspannung U_A wird den Eingangsanschlüssen 2', 3' der Stelleinheit 54' unmittelbar als Eingangsspannung U_E zugeführt. Da überdies den Eingangsanschlüssen 2, 3 der Stelleinheit 54 die von der Spannungsquelle 1 abgegebene Versorgungsspannung U_V als Eingangsspannung zugeführt wird und die an den Ausgangsanschlüssen 5', 6' der Stelleinheit 54' abgegebene Ausgangsspannung als Lastspannung U_L an die Last 7 angelegt ist, liegen die beiden ersten Wicklungen 9, 9' der beiden Transformatoren 8, 8' von der Spannungsquelle 1 her gesehen mit der Last 7 in Reihe.

Die Tatsache, daß die beiden Stelleinheiten 54, 54' keine Kurzschlußschalter besitzen, bedeutet, daß jede von ihnen nur in drei der oben definierten vier Schaltzustände gebracht werden kann. Läßt man den nur für den Notfall eines Lastkurzschlusses in Frage kommenden vierten Schaltzustand, in dem die Schalter 37, 38, 37', 38' alle geöffnet sind, beiseite, so bleiben für jede der beiden Stelleinheiten 54, 54' als Betriebs-Schaltzustände nur die beiden ersten Schaltzustände, in die sie voneinander unabhängig gebracht werden können.

Dadurch ergeben sich für die in Fig. 4 dargestellte Transformatorschaltung insgesamt vier verschiedene Schaltzustands-Kombination.

Wegen des Fehlens des jeweils dritten Schaltzustandes kann jede der beiden Stelleinheiten 54, 54' die ihr zugeführte Eingangsspannung U_E bzw. $U_{E'}$ nur mit veränderter Amplitude, d.h. entweder mit einer additiv oder einer subtraktiv aufgeprägten Spannungsänderung $+ \Delta U_1$ oder $- \Delta U_2$ bzw. $+ \Delta U_1'$ oder $- \Delta U_2'$ weitergeben. Da die Windungsverhältnisse der weiteren Wicklungen 35, 36 und 35', 36' zur jeweils zugehörigen ersten Wicklung 9, 9' prinzipiell voneinander unabhängig festgelegt werden können, lassen sich insgesamt bei gegebener Versorgungsspannung U_V vier verschiedene Lastspannungen U_L erzeugen.

Vorzugsweise werden jedoch diese Windungsverhältnisse zur Bildung eines Stelleinheiten-Paares so festgelegt, daß die prozentuale Erhöhung der Ausgangsspannung U_{AP} des Paares gegenüber der Eingangsspannung U_{EP} des Paares, die sich bei geschlossenen Schaltern 37, 37' ergibt, gleich der prozentualen Erniedrigung der Ausgangsspannung U_{AP} gegenüber der Eingangsspannung U_{EP} ist, die sich bei geschlossenen Schaltern 38, 38' ergibt, und daß die Ausgangsspannung U_{AP} mit großer Genauigkeit gleich der Eingangsspannung U_{EP} ist, wenn die Schalter 37 und 38' geschlossen sind, sich also die vordere, d.h. näher bei der Spannungsquelle 1 befindliche Stelleinheit 54 im ersten Schaltzustand und die hintere Stelleinheit 54' im zweiten Schaltzustand befindet. Bei dieser speziellen Schaltzustands-Kombination heben sich also die Wirkungen der beiden Stelleinheiten 54 und 54' gegenseitig in etwa auf, so daß an der Last 7 die von der Spannungsquelle 1 abgegebene Wechselspannung

praktisch unverändert anliegt. Dabei ist von besonderer Bedeutung, daß diese unveränderte Weitergabe der Eingangsspannung des Stelleinheiten-Paares an den Ausgang nahezu verlustfrei erfolgt, so daß sich auch dann, wenn man mehrere solcher Stelleinheiten-Paare hintereinander schaltet, ein Wirkungsgrad von mehr als 99% erzielen läßt.

Das Stelleinheiten-Paar besitzt also vier Schaltzustands-Kombinationen, von denen drei den drei Schaltzuständen der oben beschriebenen einzelnen Stelleinheiten 4 bzw. 34 entsprechen:

$$\begin{aligned} U_{AP_1} &= U_{EP} + \Delta U_1 + \Delta U_1' \\ &= U_{EP} + \Delta U_P \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{AP_2} &= U_{EP} - \Delta U_2 - \Delta U_2' \\ &= U_{EP} - \Delta U_P \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{AP_3} &= U_{EP} + \Delta U_1 - \Delta U_2' \\ &= U_{EP} \end{aligned}$$

Die vierte Schaltzustands-Kombination bleibt dabei ungenutzt. Hinsichtlich der Schaltmöglichkeiten ist die Funktion eines solchen Stelleinheiten-Paares 54, 54' also praktisch gleich der Funktion einer einzelnen Stelleinheit 4 bzw. 34.

Ein Stelleinheiten-Paar bietet jedoch den Vorteil, daß bei gegebener Größe der aufzuprägenden Spannung und damit der zu schaltenden Leistung jede der beiden Stelleinheiten nur die Hälfte dieser Schaltleistung bewältigen

muß und daher entsprechend kleiner dimensioniert werden kann. Man benötigt zwar einen Transformator mehr, doch sind bei gleicher Schaltleistung die beiden Transformatoren 8, 8' des Stelleinheiten-Paares 54, 54' zusammen nur wenig größer und schwerer, als der eine Transformator 8 einer Stelleinheit 4 bzw. 34. Eine einzelne Stelleinheit 54 oder 54' ist auf alle Fälle erheblich kleiner und leichter als eine Stelleinheit 4 oder 34, d.h. es ergeben sich kleinere und leichtere Untereinheiten, was bei Anordnungen, bei denen eine Vielzahl von solchen Stelleinheiten bzw. Stelleinheiten-Paaren hintereinander geschaltet wird, erhebliche konstruktive Vorteile bringt. Auch der Transport gestaltet sich viel einfacher, wenn man eine solche Anlage in mehrere jeweils kleinere und leichtere Untereinheiten zerlegen kann. Zwei kleinere Einheiten bieten überdies den Vorteil, daß sie zu kleineren Verlusten führen als eine einzelne Einheit mit gleicher Schaltleistung.

Zur Erzielung von besonders hohen Schaltgeschwindigkeiten kann ein solches Stelleinheiten-Paar auch aus zwei Stelleinheiten 174, 174' aufgebaut sein, wie sie weiter unten unter Bezugnahme auf Fig. 9 beschrieben werden.

In Fig. 5 ist eine Transformatorschaltung dargestellt, die als einphasiger Spannungskonstanter für die der Last 7 zugeführte Spannung U_L dient. Dabei wird davon ausgegangen, daß für die Amplitude der der Last 7 zugeführten Wechselspannung ein Sollwert S_L vorgegeben ist, der im folgenden gleich 100% gesetzt wird, und von dem die tatsächlich an die Last 7 angelegte Spannung um maximal $\pm \delta\%$ abweichen darf. Weiterhin wird angenommen, daß die von der Wechselspannungsquelle 1 gelieferte Versorgungsspannung U_V in ihrer Amplitude um $\pm \Delta\%$ vom Nennwert U_{Vnenn} abweichen kann. Dabei kann prinzipiell der Sollwert S_L

der Lastspannung U_L gleich dem Nennwert U_{Vnenn} der Versorgungsspannung U_V oder von diesem Nennwert verschieden sein. Es stellt einen besonderen Vorteil der erfindungsgemäßen Transformatorschaltung dar, daß sie es ohne weiteres ermöglicht, die Lastspannung U_L auch auf einen Sollwert S_L , einzuregeln, der beispielsweise an oder in der Nähe der Grenze des vorgesehenen Regelbereiches liegt. Dies ist allerdings nur dann zweckmäßig, wenn Abweichungen der Versorgungsspannung nur in einer Richtung auftreten können. Wird die Versorgungsspannung z.B. mit Hilfe eines Wechselrichters aus einer Batterie-Anordnung erzeugt, so ist diese Voraussetzung ohne weiteres gegeben, da die Batterie-Gleichspannung und damit auch die Amplitude der hieraus erzeugten Wechselspannung bei längerem Betrieb mit fortschreitender Entladung der Batterie-Anordnung nur ab- aber nicht zunehmen kann.

Im folgenden wird jedoch der erste Fall ($U_{Vnenn} = S_L$) betrachtet und angenommen, daß $\Delta \gg \delta$ ist, so daß eine Regelung der Amplitude der Versorgungsspannung U_V auf den Sollwert S_L erforderlich ist.

Zu diesem Zweck ist zwischen der Spannungsquelle 1 und der Last 7 eine erfindungsgemäße Transformatorschaltung vorgesehen, die aus drei miteinander in Reihe geschalteten Stufen 55, 56, 57 besteht, von denen jede entweder von einer Stelleinheit 4, 34, 144 oder 174 gemäß Fig. 1, 2, 8 oder 9 oder von einem Stelleinheiten-Paar 54, 54' gemäß Fig. 4 oder von einem Stelleinheiten-Paar gebildet sein kann, das aus zwei Stelleinheiten 174, 174' gemäß Fig. 9 aufgebaut ist. Die Steuerung der Stufen 55, 56, 57 erfolgt mit Hilfe einer Schaltersteuerung 23, die mit jeder Stufe 55, 56, 57 über ein Leitungspaar 61, 62

verbunden ist. Diese Leitungspaare symbolisieren je nachdem, ob die Stufen 55, 56, 57 von einer Stelleinheit 4, einer Stelleinheit 34, einer Stelleinheit 144, einer Stelleinheit 174, einem Stelleinheiten-Paar 54, 54' oder einem Stelleinheiten-Paar 174, 174' gebildet werden, die Leitungen 25, 26, 27 und 30 (s. Fig. 1), die Leitungen 25, 26, 27 und 44 (s. Fig. 2), die Leitungen 158, 159, 160, 161 und 30 (s. Fig. 8), die Leitungen 163, 164, 165 und 30 (s. Fig. 9), die Leitungen 26, 27, 44, 26', 27' und 44' (s. Fig. 4) oder zweimal die Leitungen 163, 164, 165 und 30 (s. Fig. 9).

Über die Leitungen 61 gibt die Schaltersteuerung 23 die Schaltbefehle an die Schalter der Stufen 55, 56, 57 ab und erhält über die Leitungen 62 die von den Sensorwicklungen 43 erzeugte Information über die Phasenlage des Magnetflusses in den ersten Wicklungen 9 der Transformatoren 8 und damit über die günstigen Schließ-Zeitpunkte bzw. -Zeiträume für die Schalter. Weiterhin ist ein erster Komparator 63 vorgesehen, der an einem seiner beiden Eingänge eine Referenzspannung U_{ref1} erhält, die den Sollwert S_L für die Lastspannung U_L darstellt. Dem anderen seiner beiden Eingänge wird das Ausgangssignal eines ersten Meßfühlers 64 zugeführt, der die Lastspannung U_L mißt. Über die Leitung 65 gibt der Komparator 63 ein Differenzsignal an die Schaltersteuerung 23, das anzeigt, ob und wie weit die Lastspannung U_L vom Sollwert S_L abweicht. Bevor diese Abweichung aus dem zulässigen Bereich $\pm \delta$ % herausläuft, ändert die Schaltersteuerung 23 die Schaltzustände der Stufen 55, 56, 57, die daraufhin der Versorgungsspannung U_V eine neue Amplitudenänderung aufprägen und somit die Lastspannung U_L innerhalb des zulässigen Regelbereichs

$\pm \delta$ halten. Darüber hinaus ist ein zweiter Komparator 66 vorgesehen, der eine dem Nennwert U_{Vnenn} der Versorgungsspannung U_V entsprechende Referenzspannung U_{ref2} mit dem Ausgangssignal eines zweiten Meßfühlers 67 vergleicht, der eben diese Versorgungsspannung U_V mißt. Das vom zweiten Komparator 66 abgegebene Differenzsignal wird über die Leitung 68 ebenfalls der Schaltersteuerung 23 zugeführt, die somit nicht nur im Regelmodus, sondern auch im Steuerungsmodus oder in einer Kombination aus beiden arbeiten kann. Dies bietet den Vorteil, daß bei einem Kurzschluß auf der Lastseite, d.h. bei $U_L = 0$, die Schaltersteuerung aus der Tatsache, daß U_V nach wie vor von Null verschieden ist, den Störfall erkennen kann und nicht versucht, die Lastspannung U_L hochzuregeln; statt dessen kann sie die Stalleinheiten aller Stufen in den oben definierten vierten Schaltzustand bringen, in dem die ersten Wicklungen 9 aller Transformatoren 8 eine starke Drosselwirkung ausüben und somit den Last-Kurzschlußstrom begrenzen. Zur Verarbeitung der über die Leitungen 62, 68 und 65 eingehenden Information und zur Umsetzung dieser Information in entsprechende Schaltbefehle umfaßt die Schaltersteuerung 23 vorzugsweise einen Mikroprozessor.

Wie bereits erwähnt, sind die Stufen 55, 56, 57 so aufgebaut, daß jede Stufe die ihr zugeführte Eingangsspannung in einem ersten Schaltzustand bzw. in einer ersten Schaltzustands-Kombination um einen vorgegebenen Prozentsatz erhöht, in einem zweiten Schaltzustand bzw. in einer zweiten Schaltzustands-Kombination in etwa um den gleichen Prozentsatz erniedrigt und in einem dritten Schaltzustand bzw. in einer dritten Schaltzustands-Kombination in etwa unverändert weitergibt. In diesem Sinn werden im folgenden immer dann, wenn nicht ausdrücklich von

Stelleinheiten-Paaren die Rede ist, Schaltzustands-Kombinationen auch vereinfacht als erster, zweiter bzw. dritter Schaltzustand bezeichnet.

Die vorgegebenen Prozentsätze, um die die einzelnen Stufen die jeweils zugeführte Eingangsspannung ändern können, sind von Stufe zu Stufe verschieden und stehen vorzugsweise zueinander in etwa im Verhältnis von ganzzahligen Dreierpotenzen. So kann bei dem in Fig. 5 gezeigten Ausführungsbeispiel die letzte Stufe 57, die der Last 7 am nächsten liegt, die ihr zugeführte Eingangsspannung beispielsweise um $\pm A\%$ verändern oder nahezu unverändert weitergeben. Die mittlere Stufe 56 kann die ihr zugeführte Eingangsspannung um ca. $\pm 3A\%$ ändern oder nahezu unverändert weitergeben und die vorderste, der Spannungsquelle 1 am nächsten liegende Stufe 55 kann die ihr zugeführte Eingangsspannung um ca. $\pm 9A\%$ ändern oder nahezu unverändert weitergeben.

Tabelle 3

Schaltzustands-Kombination

	1	2	3
	beide addierende Wicklungen ein	beide subtrahierende Wicklungen ein	"vordere" addierende und "hintere" subtrahierende Wicklung ein
1. Stufe 55			
Stelleinheit 54 bzw. 174	addierende Wicklung + 4,5%		
	subtrahierende Wicklung - 4,9%		
Stelleinheit 54' bzw. 174'	addierende Wicklung + 4,4%	- 8,9%	+ 0,1%
	subtrahierende Wicklung - 4,2%		
Stelleinheit 54 bzw. 174	addierende Wicklung + 1,5%		
2. Stufe 56			
	subtrahierende Wicklung - 1,55%		
Stelleinheit 54' bzw. 174'	addierende Wicklung + 1,5%	+ 3,02%	+ 0,03%
	subtrahierende Wicklung - 1,45%		
3. Stufe 57			
Stelleinheit 54 bzw. 174	addierende Wicklung + 0,5%		
	subtrahierende Wicklung - 0,5%		
Stelleinheit 54' bzw. 174'	addierende Wicklung + 0,5%	+ 1,0%	+ 0,0%
	subtrahierende Wicklung - 0,5%	- 1,0%	

Für ein Ausführungsbeispiel, bei dem jede Stufe 55, 56, 57 von einem Stelleinheiten-Paar 54, 54' bzw. 174, 174' gebildet wird, ist dies in Tabelle 3 nochmals genauer für den Fall dargestellt, daß $\pm A\% \approx \pm 1\%$ gewählt wird, so daß sich für das Stelleinheiten-Paar der mittleren Stufe 56 eine mögliche Amplitudenänderung von ca. $\pm 3\%$ der diesem Paar zugeführten Eingangsspannung und für das Stelleinheiten-Paar der vordersten Stufe 55 eine mögliche Amplitudenänderung von ca. $\pm 9\%$ ergibt.

Wie man der Tabelle 3 entnimmt, ist es zweckmäßig, zur Erzielung einer möglichst symmetrischen Änderung der jeweiligen Eingangsspannung eines Stelleinheiten-Paares die durch die einzelnen weiteren Wicklungen erzielbaren prozentualen Spannungsänderungen zumindest teilweise unterschiedlich zu wählen.

So gilt für das Paar der vordersten Stufe 55, daß die addierende Wicklung der Stelleinheit 54 bzw. 174 eine Änderung von $+ 4,5\%$ zu bewirken vermag, während die subtrahierende Wicklung eine Änderung von $- 4,9\%$ bewirken kann, und die addierende bzw. subtrahierende Wicklung der Stelleinheit 54' bzw. 174' eine Änderung von $+ 4,4\%$ bzw. $- 4,2\%$ auf die Eingangsspannung dieser hinteren Stelleinheit 54' bzw. 174' der Stufe 55 aufprägen können.

Diese Prozentwerte sind durch eine entsprechende Wahl der Windungsverhältnisse so gewählt, daß sich für die drei verwendeten Schaltzustände der ersten Stufe die in Tabelle 3 rechts wiedergegebenen Gesamtänderungen ergeben, die $+ 9,1\%$, $- 8,9\%$ und $+ 0,1\%$ betragen. Diese drei Werte sind mit $0,1\%$ höher gewählt als die angestrebten $+ 9\%$, $- 9\%$ und 0% . Hierdurch wird der Spannungsabfall ausgeglichen, der sich beim Fließen des Laststromes aufgrund der verbleibenden Drosselwirkung an den betreffenden ersten Windungen dieser beiden Stell-

einheiten 54, 54' bzw. 174, 174' ergibt.

Entsprechendes gilt auch für die Stufe 56, mit um ca. 0,02% bis 0,03% höheren Werten, wie man der Tabelle 3 ohne weiteres entnehmen kann.

In Tabelle 4 sind, ähnlich wie in Tabelle 2 links nochmals die siebenundzwanzig Schaltzustands-Kombinationen aufgelistet, die sich mit einer drei Stelleinheiten-Paare umfassenden Transformatorschaltung gemäß Fig. 5 erzielen lassen, wenn für jedes Stelleinheiten-Paar nur drei Schaltzustands-Kombinationen benützt werden. Daneben ist in Tabelle 4 für jede Stelleinheit 54, 54' der drei Stelleinheiten-Paare wiedergegeben, ob die addierende oder die subtrahierende Wicklung an die zugehörige Eingangs- bzw. Ausgangsspannung angeschlossen ist. Eine "1" bedeutet, daß die betreffende weitere Wicklung an die zugehörige Spannung angeschlossen ist, während eine "0" anzeigt, daß die Wicklung durch Öffnen des betreffenden Schalters 37, 37' bzw. 38, 38' von dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 (s. Fig. 4) getrennt und damit nicht an die Eingangs- bzw. Ausgangsspannung angeschlossen ist. Die Zahlenkombination 1001 für ein Stelleinheiten-Paar bedeutet somit, daß in der vorderen, d.h. näher an der Spannungsquelle 1 liegenden Stelleinheit die addierende Wicklung eingeschaltet und die subtrahierende Wicklung ausgeschaltet ist, während bei der hinteren, näher bei der Last 7 angeordneten Stelleinheit die addierende Wicklung ausgeschaltet und die subtrahierende Wicklung eingeschaltet ist. Ein so gekennzeichnetes Stelleinheiten-Paar befindet sich also in der oben definierten dritten Schaltzustands-Kombination, in der sich die Wirkungen der vorderen und der hinteren Stelleinheit praktisch gegenseitig aufheben, so daß am Ausgang des Stelleinheiten-Paares die Eingangsspannung mit nahezu unveränderter Amplitude erscheint.

0169488

[illegible]

Bei der Kombination $n = 0$ befinden sich alle drei Stelleinheiten-Paare in dem eben geschilderten Zustand und man entnimmt der ganz rechten Spalte der Tabelle 4, daß das Verhältnis von Lastspannung U_L zur Versorgungsspannung U_V in diesem Fall gleich 1,0014 also praktisch gleich 1 ist.

Demgegenüber befinden sich z.B. bei $n = 13^+$ alle drei Stelleinheiten-Paare in einem Zustand, in dem in beiden Stelleinheiten die addierende Wicklung eingeschaltet ist (erste Schaltzustands-Kombination gekennzeichnet durch 1010). Der rechten Spalte entnimmt man, daß hier die Lastspannung U_L um 13,52% größer als die Versorgungsspannung U_V ist.

Die Schaltersteuerung 23 wählt diese Kombination dann, wenn die Versorgungsspannung U_V gegenüber dem Sollwert stark abgefallen ist.

Nimmt man an, daß die Abweichung $\pm 6\%$ der Lastspannung vom Sollwert S , der hier gleich 100% gesetzt wird, maximal $\pm 0,5\%$ betragen darf, so kann die Versorgungsspannung U_V auf 87,65% dieses Sollwerts abfallen, weil die erfindungsgemäße Transformatorschaltung diese abgesunkene Versorgungsspannung U_V um 13,52% (bezogen auf $U_V = 100\%$) anheben kann; der sich ergebende Wert für die Lastspannung von

$$\begin{aligned} U_L &= U_V \cdot 1,1352 = \\ &= 87,65 \cdot 1,1352\% = \\ &= 99,5\% \text{ (bezogen auf den Sollwert)} \end{aligned}$$

liegt an der unteren Grenze von 99,5% (bezogen auf den Sollwert) und somit innerhalb des zulässigen Bereichs.

Für die Schaltzustands-Kombination $n = 13^-$ gilt entsprechend, daß hier die Versorgungsspannung U_V auf 114,84% des Sollwerts angestiegen sein kann, ohne daß die Lastspannung

$$\begin{aligned} U_L &= U_V \cdot 0,8751 = \\ &= 114,84 \cdot 0,8751 = \\ &= 100,496\% \text{ (bezogen auf den Sollwert)} \end{aligned}$$

die obere Grenze 100,5% des zulässigen Bereichs übersteigt.

Entsprechendes läßt sich für alle übrigen Schaltzustands-Kombinationen n erreichen. Dabei wird vorzugsweise immer bei solchen Werten der Versorgungsspannung U_V von einer Schaltzustands-Kombination zur nächsten übergegangen, bei denen die Amplitude der Lastspannung $U_{L\text{vor}}$ vor dem Schalten und die Amplitude der Lastspannung $U_{L\text{nach}}$ nach dem Schalten zum Sollwert S_L in etwa symmetrisch liegen [siehe obige Gleichung (14)]. Aus den obigen Werten ergibt sich, daß bei diesem Ausführungsbeispiel Schwankungen der Versorgungsspannung U_V von $+\Delta = +14,84\%$ (bezogen auf den Sollwert $S = 100\%$) bis $-\Delta = -13,35\%$ (ebenfalls bezogen auf $S = 100\%$) so kompensiert werden können, daß die Lastspannung U_L nur innerhalb eines Bereiches von $S \pm 0,5\%$ schwankt.

Entsprechendes -jedoch eingeschränkt- gilt auch, wenn die Stufen 55,56,57 von einem Stelleinheiten-Paar aus zwei Stelleinheiten 174, 174' gemäß Fig. 9 oder von einzelnen Stelleinheiten 4 bzw. 34 bzw. 144 gebildet werden.

Soll ein größerer Schwankungsbereich $\pm \Delta\%$ erfaßt werden, muß entweder die minimale Amplitudenänderung A vergrößert werden, was auf Kosten der Regelgenauigkeit δ geht, oder es muß die Anzahl der Stufen vergrößert werden. Dabei kann es zweckmäßig sein, eine Stufe hinzuzufügen, deren

Änderungsbereich nicht gleich der nächsten ganzzahligen Dreierpotenz von A, hier also nicht gleich $\pm 27A$ ist, sondern nur ein ganzzahliges Vielfaches kleiner 27 von A beträgt, das so groß ist, daß dann, wenn alle vier Stufen in derselben Richtung, d.h. alle additiv oder alle subtraktiv wirken, der geforderte Schwankungsbereich $\pm \Delta$ gerade überdeckt werden kann.

Fig. 6 zeigt eine Abwandlung der erfindungsgemäßen Schaltungsanordnung, wie sie zur Steuerung der von einem Dreiphasen-Netz abgegebenen Spannung Verwendung finden kann.

Wie man der Fig. 6 entnimmt, ist für jeden der drei Phasenleiter R, S und T eine erfindungsgemäße Transformatorschaltung 75, 76, 77 vorgesehen, die jeweils in gleicher Weise aufgebaut ist, wie die Transformatorschaltung in Fig. 5. Es besteht also jede dieser drei Transformatorschaltungen 75, 76, 77 aus drei in Reihe geschalteten Stufen 55, 56, 57, von denen hier jede aus einem Stelleinheiten-Paar 54,54' bzw. 174,174' besteht und vier verschiedene Schaltzustände annehmen kann. Somit können der Wechselspannung auf jedem der drei Phasenleiter R, S und T Änderungsbeträge aufgeprägt werden, die zueinander im Verhältnis 1 : 3 : 9 stehen, oder es kann die Eingangsspannung unverändert weitergegeben werden oder es kann der Laststrom gedrosselt werden.

Um die Stufen der Transformatorschaltungen 75, 76, 77 in der erforderlichen Weise in die drei verschiedenen Schaltzustände bringen zu können, ist jede der Transformatorschaltungen 75, 76, 77 nicht nur mit ihrem zugehörigen Phasenleiter R, S bzw. T, sondern auch mit dem Nullleiter N verbunden. Als Spannungsquelle dient hier ein Dreiphasen-Netz 80.

Die auf den einzelnen Phasenleitern R, S, T vom Netz 80 gelieferten Spannungsamplituden werden mit Hilfe einer Meßfühleranordnung 81 ständig gemessen, die die drei Meßsignale einer Komparatoranordnung 82 zuführt. Dort werden die Meßsignale mit einem gemeinsamen Referenzwert U_{ref} verglichen. Alternativ kann auch für jeden Phasenleiter R, S und T ein eigener Referenzwert vorgegeben werden.

Der Komparator 82 erzeugt für jeden der drei Phasenleiter R, S, T ein eigenes Differenzsignal, das einer Schaltersteuerung 83 zugeführt wird. Diese steuert über die Leitungsgruppen 85, 86, 87, die Schalter der Stufen 55, 56, 57 in jeder der Transformatorschaltungen 75, 76, 77 in der Weise, wie dies oben ausführlich erläutert wurde. Selbstverständlich ist auch hier jede Stelleinheit über mehrere Leitungen mit der Schaltersteuerung 83 verbunden, wie dies in den Fig. 1, 2, 4, 8 und 9 dargestellt ist. Der Einfachheit halber wurden in Fig. 6 diese Leitungen jedoch nur als eine einzige bidirektionale Leitung dargestellt.

Den Ausgang einer jeden Transformatorschaltung 75, 76, 77 bildet ein Phasenleiter R_K , S_K bzw. T_K , wobei der Buchstabe "K" andeutet, daß auf diesen Phasenleitern eine Wechselspannung mit konstant gehaltener Amplitude zur Verfügung steht. Diese Spannungen können entweder gemeinsam einer einzigen, einen Drei-Phasen-Strom benötigenden Last oder verschiedenen Lasten zugeführt werden, die jeweils nur mit einem 1-phasigen Wechselstrom betrieben werden müssen.

Alternativ kann auch bei einem Mehrphasensystem die Meßfühleranordnung 81 so ausgebildet sein, daß sie die auf den Phasenleitern R_K , S_K , T_K der oder den Lasten zugeführten Wechselspannungen mißt.

Bei größeren Anforderungen an die Regelgenauigkeit oder bei noch größeren Regelbereichen können auch bei den Transformatorschaltungen 75, 76, 77 mehr als drei Stufen vorgesehen werden. Analog zu Fig. 6 kann die erfindungsgemäße Schaltungsanordnung auch bei Mehrphasen-Systemen eingesetzt werden, die weniger oder mehr als drei Phasen umfassen.

In Fig. 7 ist eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Transformatorschaltung dargestellt, die nur eine einzige Stelleinheit 94 umfaßt. Wie bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel wird auch hier den Eingangsanschlüssen 2, 3 der Stelleinheit 94 als Eingangsspannung U_E eine Versorgungsspannung U_V zugeführt, die von einer Spannungsquelle 1 stammt. An den Ausgangsanschlüssen 5, 6 erscheint eine Ausgangsspannung U_A , die einer Last 7 als Lastspannung U_L zugeführt wird. Weiterhin umfaßt die Stelleinheit 94 einen Transformator 8, dessen erste Wicklung 9 zwischen den Eingangsanschluß 2 und den Ausgangsanschluß 5 geschaltet ist, während der andere Eingangsanschluß 3 mit dem zweiten Ausgangsanschluß 6 mittels des Anschluß-Verbindungsleiters 10 direkt galvanisch leitend verbunden ist. Auch besitzt der Transformator 8 eine weitere Wicklung 11, die über den Eisenkern 12 des Transformators 8 mit der ersten Wicklung 9 magnetisch gekoppelt ist.

Im Gegensatz zum Ausführungsbeispiel in Fig. 1 kann aber die Stelleinheit 94 des vorliegenden Ausführungsbeispiels nicht nur in vier sondern in vierunddreißig verschiedene Schaltzustände gebracht werden, so daß es möglich ist, insgesamt zweiunddreißig verschiedene Amplituden-Differenzen zwischen der Eingangsspannung U_E und der Ausgangsspannung U_A der einen Stelleinheit 94 zu erzeugen, die Eingangsspannung U_E unverändert an den Ausgangsanschlüssen 5, 6 zur Verfügung zu stellen

bzw. im Fall eines Kurzschlusses an der Last den Laststrom zu drosseln.

Diese große Variationsmöglichkeit erlaubt es, die in Fig. 7 dargestellte Transformatorschaltung ähnlich wie die Transformatorschaltungen in den Fig. 5 und 6 als Spannungsregler und/oder Spannungskonstanter einzusetzen.

In Fig. 7 ist der Verwendungsfall als Spannungsregler dargestellt, bei dem wiederum einer Meßfühleranordnung 64 über Leitungen 95, 96 die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 94, die hier gleich der Lastspannung U_L ist, zugeführt wird. Der Meßfühler 64 gibt ein Meßsignal an einen Komparator 63 weiter, der dieses Meßsignal mit einer Referenzspannung U_{ref} vergleicht, die dem Sollwert S_L der Lastspannung U_L entspricht. Über die Leitung 65 gibt der Komparator 63 ein den Unterschied zwischen dem Meßsignal und der Referenzspannung U_{ref} darstellendes Differenzsignal an eine Schaltersteuerung 23 weiter, die über Leitungen 97 eine aus vierzehn Schaltern bestehende Schaltergruppe 98 ansteuert, um die Stelleinheit 94 in die verschiedenen Schaltzustände zu bringen, wie dies im folgenden noch genauer erläutert wird.

Um neben den beiden Schaltzuständen, in denen die weitere Wicklung 11 entweder kurzgeschlossen oder völlig offen ist, die Stelleinheit 94 in zweiunddreißig weitere Schaltzustände bringen zu können, müssen an die weitere Wicklung 11 zweiunddreißig Steuerspannungen U_{S1} bis U_{S32} angelegt werden, die gemäß der Erfindung mit Hilfe einer einzigen Wechselspannungsquelle 100 erzeugt werden.

Die Wechselspannungsquelle 100 wird von einer Zusatztransformator-Anordnung 101 gebildet, die im vorliegenden

Fall aus sechs elektrisch miteinander in Reihe geschalteten Wicklungsabschnitten 104 bis 109 besteht, die über einen gemeinsamen Transformator Kern 111 magnetisch miteinander gekoppelt sind.

Das eine Ende der aus den Wicklungsabschnitten 104 bis 109 bestehenden Serienschaltung ist galvanisch direkt leitend mit dem einen Pol der Wechselspannungsquelle 1 verbunden, an den auch der Eingangsanschluß 3 der Stelleinheit 94 angeschlossen ist, der über den Anschluß-Verbindungsleiter 10 galvanisch direkt leitend mit dem Ausgangsanschluß 6 der Stelleinheit 94 verbunden ist. Das andere Ende der aus den Wicklungsabschnitten 104 bis 109 bestehenden Serienschaltung ist über eine Leitung 114 mit dem zweiten Ausgangsanschluß 5 der Stelleinheit 94 verbunden. Somit liegt an der Serienschaltung der Wicklungsabschnitte 104 bis 109 die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 94 an.

Die Serienschaltung der Wicklungsabschnitte 104 bis 109 weist sieben Abgriffe 121 bis 127 auf, von denen die Abgriffe 121 und 127 mit den beiden äußeren Enden der Serienschaltung verbunden sind, während die Abgriffe 122 bis 126 jeweils zwischen zwei einander benachbarten Wicklungsabschnitten herausgeführt sind.

Jeder der Abgriffe 121 bis 127 ist mit einem Paar von Ein/Aus-Schaltern aus der Schaltergruppe 98 verbunden. Der eine Schalter eines jeden Schalterpaares verbindet im geschlossenen Zustand den zugehörigen Abgriff mit einer Leitung 129, die mit dem in Fig. 7 unteren Ende der weiteren Wicklung 11 verbunden ist. Der andere Schalter eines jeden Paares verbindet im geschlossenen Zustand den zugehörigen Abgriff mit einer Leitung 130, die mit dem anderen Ende der weiteren Wicklung 11 in

Verbindung steht. Sämtliche Schalter der Schaltergruppe 98 werden, wie bereits erwähnt, über die Leitungen 97 von der Schaltersteuerung 23 so angesteuert, daß an der weiteren Wicklung 11 immer die gerade erforderliche Steuerspannung U_{S1} bis U_{S32} anliegt, oder daß die beiden Schalter eines beliebigen Paares gleichzeitig geschlossen sind, um die weitere Wicklung 11 kurzzuschließen, oder daß alle Schalter 98 geöffnet sind, um den Laststrom zu drosseln.

Für eine symmetrische Regelung der Lastspannung U_L um den Sollwert S_L kann die Stelleinheit in zweiunddreißig verschiedene Schaltzustände gebracht werden, von denen sechzehn zur additiven Aufprägung der jeweils induzierten Spannungen ΔU_1 bis ΔU_{31} und sechzehn zur negativen Aufprägung der jeweils induzierten Spannung ΔU_2 bis ΔU_{32} vorgesehen sind. Dabei ist die Amplitude einer jeden positiv aufgeprägten Spannung gleich der Amplitude einer entsprechend negativ aufgeprägten Spannung.

Da sich das Vorzeichen der Aufprägung aus dem Wicklungssinn ergibt, mit dem die weitere Wicklung 11 an eine Steuerspannung angeschlossen wird, sind also nur sechzehn Steuerspannungen U_{S1} bis U_{S16} mit verschiedenen Amplituden erforderlich, da die weitere Wicklung 11 mit Hilfe der Schalter 98 mit zwei verschiedenen Richtungen des Wicklungssinns an die verschiedenen Abgriffe 121 bis 127 gelegt werden kann.

Um die sechzehn unterschiedlichen Steuerspannungsamplituden abgreifen zu können, sind die Windungszahlen der Wicklungsabschnitte 104 bis 109 gemäß einem Kode aufeinander abgestimmt, der so optimiert ist, daß einerseits eine möglichst kleine Anzahl von Wicklungsabschnitten 104 bis 109 und damit auch von Abgriffen 121 bis 127 und Schaltern 98 benötigt wird, und daß

andererseits die maximale benötigte Steuerspannung U_{Smax} zwischen den am weitesten auseinander liegenden Abgriffen 121 und 127 abgegriffen werden kann.

Gemäß diesem optimierten Kode besitzt der Wicklungsabschnitt 109 eine solche Windungszahl, daß dann, wenn an der Serienschaltung aller Wicklungsabschnitte 104 bis 109 die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 94 anliegt, von diesem Wicklungsabschnitt 109 eine Abgriffsspannung $1 \cdot U_{Xmin}$ abgreifbar ist, die der kleinsten benötigten Steuerspannung U_{Smin} entspricht.

Durch gleichzeitiges Schließen des in Fig. 7 oberen Schalters des Schalterpaares 132 und des unteren Schalters des Schalterpaares 131 kann also an die weitere Wicklung 11 die kleinste benötigte Steuerspannung U_{Smin} so angelegt werden, daß die hierdurch in der ersten Wicklung 9 des Transformators 8 induzierte Spannung ΔU_{min} auf die Eingangsspannung U_E subtraktiv aufgeprägt wird. Werden statt dessen der in Fig. 7 untere Schalter des Paares 132 und der obere Schalter des Paares 131 gleichzeitig geschlossen, so liegt an der weiteren Wicklung 11 dieselbe kleinste Steuerspannung U_{Smin} an, doch ist der Wicklungssinn der weiteren Wicklung 11 gegenüber dem vorausgehenden Fall invertiert, so daß nunmehr die induzierte Spannung ΔU_{min} auf die Eingangsspannung U_E additiv aufgeprägt wird. Entsprechendes gilt auch für die zwischen beliebigen anderen Abgriffen 121 bis 127 abgreifbaren Steuerspannungen.

Gemäß dem optimierten Kode sind die Windungszahlen der übrigen Wicklungsabschnitte 104 bis 108 so gewählt, daß zwischen benachbarten Abgriffen 121 bis 126 jeweils folgende Abgriffsspannungen zur Verfügung stehen:

Tabelle 5

Abgriffspaar	U_X
121, 122	2 . U_{Xmin}
122, 123	1 . U_{Xmin}
123, 124	4 . U_{Xmin}
124, 125	6 . U_{Xmin}
125, 126	2 . U_{Xmin}

Zusammen mit der Spannung 1 . U_{Xmin} am Abgriffspaar 126, 127 ergibt dies die Möglichkeit, alle Steuerspannungsamplituden von 1 . U_{Smin} bis 16 . U_{Smin} entweder direkt an unmittelbar benachbarten Abgriffen oder zwischen weiter auseinanderliegenden Abgriffen abzugreifen, wie dies in der folgenden Tabelle 6 dargestellt ist:

Tabelle 6

Steuerspannung	Abgriffe
1 . U_{Smin}	126, 127
2 . "	125, 126
3 . "	125, 127
4 . "	123, 124
5 . "	122, 124
6 . "	124, 125
7 . "	121, 124
8 . "	124, 126
9 . "	124, 127
10 . "	123, 125
11 . "	122, 125
12 . "	123, 126
13 . "	123, 127
14 . "	122, 127
15 . "	121, 126
16 . "	121, 127

Man sieht, daß auch hier der optimierte Kode sich dadurch auszeichnet, daß an dem einen am Ende der Serienschaltung liegenden Wicklungsabschnitt 109 das 1-fache der minimalen Abgriffsspannung U_{Xmin} und an dem am anderen Ende liegenden Wicklungsabschnitt 104 das 2-fache von U_{Xmin} abgreifbar ist.

Um entsprechende Verhältnisse wie bei dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel zu erhalten, kann bei dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel vorgesehen sein, daß die Leitung 114 im Punkt 140 nicht fest mit der Leitung 95 verbunden ist. Statt dessen können hier zwei im Gegentakt betätigbare Schalter angeordnet werden, mit deren Hilfe das von der Serienschaltung der Wicklungen 104 bis 109 entfernt liegende Ende der Leitung 114 über entsprechende Leitungen entweder mit der vom Ausgangsanschluß 5 zur Last 7 führenden Leitung oder mit der von der Spannungsquelle 1 zum Eingangsanschluß 2 führenden Leitung verbunden werden kann. Diese Schalter werden dann ebenfalls von der Schaltersteuerung 23 angesteuert, um an die Serienschaltung der Wicklungen 104 bis 109 entweder die Eingangsspannung U_E oder die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 94 anzulegen. Ersteres findet vorzugsweise dann statt, wenn durch eine entsprechende an die weitere Wicklung 11 angelegte Steuerungsspannung $U_{S1}, \dots, U_{S31}$ in der ersten Wicklung 9 eine Spannung $\Delta U_1, \dots, \Delta U_{31}$ induziert werden soll, die sich auf die Eingangsspannung U_E additiv aufprägt. An die Ausgangsspannung U_A wird die Leitung 114 dagegen vorzugsweise dann angeschlossen, wenn in der ersten Wicklung 9 eine Spannung $\Delta U_2, \dots, \Delta U_{32}$ induziert werden soll, die sich auf die Eingangsspannung U_E subtraktiv aufprägt.

Fig. 8 zeigt wieder eine einzelne Stelleinheit 144, die ähnlich wie die Stelleinheit 4 aus Fig. 1 aufgebaut und in gleicher Weise zur Veränderung der Amplitude einer Wechselspannung zwischen eine Wechselspannungsquelle 1 und eine Last 7 geschaltet ist. Schaltungsteile in Fig. 8, die in gleicher Weise in Fig. 1 vorhanden sind, tragen wieder dieselben Bezugszeichen. Insbesondere weist auch in Fig. 8 der Transformator nur eine einzige weitere Wicklung 11 auf, die über den Eisenkern 12 des Transformators 8 mit dessen erster Wicklung 9 magnetisch gekoppelt ist. Mit den beiden Enden 13, 14 der weiteren Wicklung 11 sind jeweils zwei Schalter 150, 152 bzw. 151, 153 verbunden.

Ist der Schalter 150 geschlossen, so verbindet er das Ende 13 der weiteren Wicklung 11 mit dem Eingangsanschluß 2, mit dem auch das eine Ende der ersten Wicklung 9 verbunden ist. Ist der Schalter 151 geschlossen, so verbindet er das andere Ende 14 der weiteren Wicklung 11 mit dem Ausgangsanschluß 5, mit dem das andere Ende der ersten Wicklung 9 verbunden ist.

Ist der Schalter 152 geschlossen, so verbindet er das Ende 13 der weiteren Wicklung 11 mit einer Leitung 155, mit der der Schalter 153 im geschlossenen Zustand auch das andere Ende 14 der weiteren Wicklung 11 verbindet. Zwischen der Leitung 155 und dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 ist eine Schaltungsanordnung 157 vorgesehen, die ein einfacher steuerbarer Aus/Ein-Schalter sein kann, vorzugsweise aber von einer Strombegrenzungsschaltung gebildet wird, wie sie weiter unten unter Bezugnahme auf Fig. 10 noch genauer erläutert wird.

Mit Hilfe der Schalter 150 bis 153 kann die Stelleinheit 144 in vier verschiedene Schaltzustände gebracht werden. Im ersten Schaltzustand, in dem die Schalter 150 und 153 geschlossen sind, wird an die weitere Wicklung 11 und die mit ihr in Reihe liegende Strombegrenzungsschaltung 157 die Eingangsspannung U_E angelegt. Da der Grenzwert, auf den die Strombegrenzungsschaltung 157 den sie durchfließenden Strom begrenzt, größer gewählt ist, als der Strom, der in diesem ersten Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 fließt,

ist der Spannungsabfall an der Strombegrenzungsschaltung 157 sehr klein und es liegt praktisch die gesamte Eingangsspannung U_E an der weiteren Wicklung 11 als Steuerspannung an. Der durch die Punkte 19, 20 definierte Wicklungssinn der Wicklungen 9, 11 ist so gewählt, daß sich die Spannung ΔU_1 , die in diesem ersten Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 in der ersten Wicklung 9 induziert wird, zur Eingangsspannung U_E addiert. Zwischen den Ausgangsanschlüssen 5, 6 der Stelleinheit erhält man also die Spannung

$$U_{A1} = U_E + \Delta U_1.$$

Der Amplituden-Absolutbetrag der induzierten Spannung ΔU_1 ist dabei durch das Windungsverhältnis w_1/w_w der ersten Wicklung 9 zur weiteren Wicklung 11 nach der Gleichung $\Delta U_1 = w_1 U_E / w_w$ festgelegt.

Im zweiten Schaltzustand, der in Fig. 8 dargestellt ist, sind die Schalter 150 und 153 geöffnet und sind die Schalter 151 und 152 geschlossen, wodurch an die weitere Wicklung 11 und die mit ihr wieder in Serie liegende Strombegrenzungsschaltung 157 die Ausgangsspannung U_A der Stelleinheit 144 gelegt ist. Da der in diesem zweiten Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 fließende Strom in etwa gleich dem Strom ist, der durch die weitere Wicklung 11 im ersten Schaltzustand fließt, liegt auch dieser Strom unter dem

Grenzwert der Strombegrenzungsschaltung 157, so daß deren Widerstand auch in diesem zweiten Schaltzustand sehr klein ist und praktisch die gesamte Ausgangsspannung U_A an der weiteren Wicklung 11 anliegt. Der Wicklungssinn der weiteren Wicklung 11 ist gegenüber dem ersten Schaltzustand umgekehrt. Dadurch subtrahiert sich die Spannung ΔU_2 , die in diesem zweiten Schaltzustand in der ersten Wicklung 9 des Transformators 8 induziert wird, von der Eingangsspannung U_E , so daß man am Ausgang 5, 6 erhält:

$$U_{A2} = U_E - \Delta U_2$$

Für die induzierte Spannung gilt in diesem Fall

$\Delta U_2 = w_1 U_E / (w_w + w_1)$. Es ist also die im zweiten Schaltzustand induzierte Spannung ΔU_2 etwas kleiner als die im ersten Schaltzustand induzierte Spannung ΔU_1 .

In einem dritten Schaltzustand der Stelleinheit 144 sind zumindest die beiden Schalter 150 und 151 geschlossen, so daß die weitere Wicklung 11 mit antiparallelem Wicklungssinn zur ersten Wicklung 9 und elektrisch parallel zu dieser ersten Wicklung 9 an der gleichen Spannung wie diese liegt. Der Transformator 8 ist in diesem Schaltzustand also kurzgeschlossen und die Ströme, die in den beiden antiparallelen Wicklungen 9, 11 fließen, versuchen, jeweils ein Magnetfeld aufzubauen; diese Felder sind jedoch einander entgegengerichtet und heben sich nahezu auf.

Die Streuinduktivität der ersten Wicklung 9 kann so gering gehalten werden, daß die erste Wicklung 9 dem durch sie hindurchfließenden Laststrom in diesem Schalt-

zustand nur ihren sehr kleinen ohmschen Widerstand entgegensetzt, wodurch der an der ersten Wicklung 9 auftretende Spannungsabfall sehr klein ist. Dies bedeutet, daß in diesem dritten Schaltzustand gilt

$$U_A = U_E.$$

Als treibende Spannung für den durch die weitere Wicklung 11 fließenden Kurzschlußstrom steht nur der geringe Spannungsabfall an der ersten Wicklung 9 zur Verfügung, so daß auch der Kurzschlußstrom durch die weitere Wicklung 11 sehr gering bleibt. Da der Scheinwiderstand der weiteren Wicklung 11 erheblich größer als der der ersten Wicklung 9 ist, fließt der Laststrom praktisch ausschließlich durch die erste Wicklung 9.

Wenn immer sichergestellt ist, daß die Schalter 152, 153 beide geöffnet sind, wenn die Schalter 150, 151 geschlossen sind, kann auf die Strombegrenzungsschaltung 157 verzichtet, d.h. der Leiter 155 unmittelbar mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 galvanisch leitend verbunden werden. Dies hat allerdings zur Folge, daß beim Umschalten beispielsweise von dem in der Fig. 8 dargestellten zweiten Schaltzustand in den ersten Schaltzustand zunächst die Schalter 151, 152 geöffnet werden müssen, und daß erst dann, wenn diese Schalter mit Sicherheit offen sind, die Schalter 150, 153 geschlossen werden können. Würden nämlich bei fehlender Strombegrenzungsschaltung 157 alle vier Schalter 150 bis 153 gleichzeitig geschlossen, so wären sowohl die Eingangsspannung U_E als auch die Ausgangsspannung U_A kurzgeschlossen, was zu unzulässig hohen Kurzschlußströmen und zu einem unerwünschten Zusammenbrechen dieser Spannungen führen würde.

Ohne eine Strombegrenzungsschaltung 157 müßten also beim Übergang von einem Schaltzustand in den anderen zunächst die bisher geschlossenen Schalter geöffnet werden, was dann, wenn man als Schalter Triacs verwendet, nur beim Nulldurchgang des durch sie hindurchfließenden Stroms möglich wäre, und es müßten dann die für den neuen Schaltzustand zu schließenden Schalter geschlossen werden, wofür wieder bestimmte Zeitpunkte abgewartet werden müßten, in denen sich durch diesen Umschaltvorgang möglichst geringe Schaltspitzen in der Ausgangsspannung U_A ergeben. Dies führt insgesamt dazu, daß frühestens nach ein- einhalb bis zwei Perioden der Ausgangswechselspannung U_A der neue Amplitudenwert stabil zur Verfügung steht.

Zur Beschleunigung der Umschaltvorgänge ist es daher vorteilhaft, die Strombegrenzungsschaltung 157 vorzusehen. Sie ermöglicht es, bei einem Umschaltvorgang, durch den die Stelleinheit beispielsweise aus dem in Fig. 8 dargestellten zweiten Schaltzustand in den ersten Schaltzustand umgeschaltet werden soll, die Stelleinheit 144 zuerst in den dritten Schaltzustand zu bringen, was durch Schließen des ersten Schalters 150 geschieht. Kurze Zeit später wird dann der dritte Schalter 152 geöffnet und hierauf der vierte Schalter 153 geschlossen. Dabei bleibt die Stelleinheit im dritten Schaltzustand, da der erste Schalter 150 und der zweite Schalter 151 in dieser Zeit geschlossen sind. Ein Kurzschließen der beiden Wicklungen 9 und 11 durch den weiteren Leiter 155 wird dadurch vermieden, daß die beiden Schalter 152 und 153 nicht gleichzeitig geschlossen sind. Während der gesamten Zeit, in der sich die Stelleinheit 144 im dritten Schaltzustand befindet, verhindert die Strombegrenzungsschaltung 157 das Fließen eines unzulässig großen Kurzschlußstroms vom Anschluß 5 bzw. vom Anschluß 2 zum Anschluß-Verbindungsleiter

10 über die gleichzeitig geschlossenen Schalter 151, 153 bzw. die gleichzeitig geschlossenen Schalter 150, 152. Als letzter Schritt des Umschaltvorganges wird dann der Schalter 151 geöffnet, wodurch die Stelleinheit aus dem dritten Schaltzustand in den ersten Schaltzustand übergeht.

Entsprechendes gilt auch für einen Umschaltvorgang, der vom ersten in den zweiten Schaltzustand führt.

Bei den eben beschriebenen Umschaltvorgängen durchläuft die Stelleinheit 144 also auch immer dann, wenn vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand übergegangen werden soll, kurzfristig den dritten Schaltzustand. Soll die Stelleinheit 144 längere Zeit im dritten Schaltzustand gehalten werden, werden die Schalter 152 und/oder 153 geöffnet, so daß vom Eingangsanschluß 2 bzw. vom Ausgangsanschluß 5 keine Ströme mehr zum Anschluß-Verbindungsleiter 10 fließen können und somit die Verlustleistung noch weiter reduziert wird.

In einem vierten Schaltzustand sind alle vier Schalter 150 bis 153 geöffnet, so daß der Stromkreis der weiteren Wicklung 11 einen hohen Widerstandswert besitzt, der auch nach Heruntertransformation auf der Seite der ersten Wicklung 9 einen hohen Widerstandswert liefert. Somit tritt an der ersten Wicklung ein von der Größe des Laststroms abhängiger Spannungsabfall auf. Diese Drosselwirkung der ersten Wicklung 9 im vierten Schaltzustand kann dazu verwendet werden, beim Auftreten eines Kurzschlusses an der Last die der Last zugeführte Leistung zumindest solange auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen, bis weitere Abschaltmaßnahmen getroffen worden sind.

Die Schalter 150 bis 153 werden durch eine Schaltersteuerung 23 betätigt, die über Leitungen 158, 159, 160 und 161 die Schalter ansteuert. Die hierfür nötigen Informationen kann die Schaltersteuerung 23 von einem in der Fig. 8 nicht wiedergegebenen Komparator erhalten, der die Lastspannung U_L und/oder die Versorgungsspannung U_V mit Sollwerten vergleicht und bei Abweichungen entsprechende Differenzsignale abgibt, wie dies oben ausführlich beschrieben ist. Weiterhin umfaßt der Transformator 8 der Stelleinheit 144 eine Kurzschlußwicklung 28, die mit Hilfe eines Schalters 29, der zu ihr parallel liegt, kurzgeschlossen werden kann. Auch dieser Schalter 29 wird von der Schaltersteuerung 23 über eine Leitung 30 angesteuert. Dies erfolgt gemäß der Erfindung nur dann, wenn bei den Schaltern 150 bis 153 bzw. in der Strombegrenzungsschaltung 157 bestimmte Störungen auftreten, wie dies weiter unten noch genauer erläutert wird.

Alternativ zu der eben beschriebenen Ausführungsform kann die Strombegrenzungsschaltung 157 in der Stelleinheit 144 weggelassen werden, ohne daß es zu den oben erwähnten Verzögerungen im Umschaltvorgang kommen muß. Dies wird dadurch erreicht, daß die beiden Schalter 152, 153, die dann wieder unmittelbar mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 verbunden sind, jeweils als Strombegrenzungsschaltung ausgebildet werden, deren Grenzwert zwischen dem Wert Null und einem von Null verschiedenen Wert hin- und hergeschaltet werden kann. Wird eine solche Strombegrenzungsschaltung auf den Grenzwert Null geschaltet, so entspricht dies dem geöffneten Zustand eines Schalters. Ist sie dagegen auf den von Null verschiedenen Grenzwert geschaltet, so setzt sie dem durch sie hindurchfließenden Strom nur einen sehr kleinen, konstanten Widerstand entgegen, solange dieser Strom deutlich unterhalb des Grenzwertes bleibt. Dabei wird dieser Grenzwert so

gewählt, daß er größer ist als der Strom, der im ersten bzw. im zweiten Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 und den betreffenden Schalter 153 bzw. 152 fließen muß.

Eine Schaltungsanordnung, die die eben beschriebenen Eigenschaften besitzt, wird weiter unten unter Bezugnahme auf Fig.10 noch näher erläutert.

In dem eben geschilderten Fall erfolgt die Umschaltung vom ersten in den zweiten Schaltzustand oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand in der Weise, daß die beiden bisher geöffneten Schalter gleichzeitig geschlossen und kurze Zeit später die beiden Schalter gleichzeitig geöffnet werden, die im neuen Schaltzustand offen sein müssen. Sind die Schalter 150 und 151 mit Hilfe von Triacs realisiert, so muß mit diesem Öffnungsvorgang bis zum nächsten Nulldurchgang des Stromes gewartet werden, der vor dem Öffnen durch den betreffenden Schalter 150 oder 151 fließt.

Auch bei dieser Ausführungsform kann die Stelleinheit in den vierten Schaltzustand dadurch gebracht werden, daß alle vier Schalter 150 bis 153 gleichzeitig geöffnet werden.

In Fig. 9 ist eine Transformatorschaltung mit einer Stelleinheit 174 dargestellt, deren Aufbau sich zwar von dem der Stelleinheit 144 unterscheidet, die aber im Prinzip die gleichen Funktionen aufweist.

Die Stelleinheit 174 umfaßt wiederum einen Transformator 8, dessen erste Wicklung zwischen den Eingangsanschluß 2 und den Ausgangsanschluß 5 geschaltet ist, während der andere Eingangsanschluß 3 über den An-

schluß-Verbindungsleiter 10 direkt galvanisch leitend mit dem anderen Ausgangsanschluß 6 verbunden ist.

Ähnlich wie bei der Stelleinheit 34 in Fig. 2 besitzt hier der Transformator 8 ebenfalls zwei weitere Wicklungen 35, 36, von denen die eine als addierende weitere Wicklung 35 mit ihrem einen Ende fest mit dem Ende der ersten Wicklung 9 galvanisch leitend verbunden ist, das mit dem Eingangsanschluß 2 direkt galvanisch leitend verbunden ist, während das andere Ende der addierenden Wicklung 35 mit Hilfe eines Schalters 180 mit einer Leitung 185 verbunden oder von dieser getrennt werden kann, die ihrerseits über eine Strombegrenzungsschaltung 157 mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 verbunden ist. Die andere der beiden Wicklungen ist als subtrahierende weitere Wicklung 36 mit ihrem einen Ende fest und direkt galvanisch leitend mit dem Ende der ersten Wicklung 9 verbunden, das direkt galvanisch leitend mit dem Ausgangsanschluß 5 der Stelleinheit 174 verbunden ist, während das andere Ende der subtrahierenden weiteren Wicklung 36 mit Hilfe eines Schalters 181 mit der Leitung 185 verbunden oder von dieser getrennt werden kann. Der Wicklungssinn der drei Wicklungen 9, 35 und 36, die über den Kern 12 magnetisch miteinander gekoppelt sind, ist durch die Punkte 19, 20 und 21 gekennzeichnet. Er ist so gewählt, daß sich die Spannung ΔU_1 , die durch die weitere Wicklung 35 bei geschlossenem Schalter 180 in der ersten Wicklung 9 induziert wird, zur Eingangsspannung U_E addiert (erster Schaltzustand), und daß sich die Spannung ΔU_2 , die bei geschlossenem Schalter 181 von der weiteren Wicklung 36 in der ersten Wicklung 9 induziert wird, von der Eingangsspannung U_E subtrahiert (zweiter Schaltzustand). Auch hier ist der Grenzwert der Strombegrenzungsschaltung 157 größer als die Ströme gewählt, die im ersten Schaltzustand durch die addierende Wicklung 35 bzw. im zweiten Schaltzustand durch die subtrahierende

Wicklung 36 fließen. Somit ist in diesen beiden Schaltzuständen der Widerstand der Strombegrenzungsschaltung 157 praktisch vernachlässigbar und es liegt die gesamte Eingangsspannung U_E bzw. die gesamte Ausgangsspannung U_A an der addierenden Wicklung 35 bzw. an der subtrahierenden Wicklung 36 an.

Um diese in Fig. 9 dargestellte Stelleinheit in den dritten Schaltzustand bringen zu können, ist es erforderlich, die beiden Schalter 180 und 181 gleichzeitig zu schließen, wodurch die beiden weiteren Wicklungen 35, 36 mit gleichem Wicklungssinn miteinander in Reihe geschaltet und mit antiparallelem Wicklungssinn zur ersten Wicklung 9 parallelgeschaltet sind. Da in diesem Schaltzustand die beiden weiteren Wicklungen 35, 36 als eine einzige Wicklung betrachtet werden können, erhält man also den gleichen Schaltzustand, wie er oben als dritter Schaltzustand der Stelleinheit 144 aus Fig. 8 beschrieben wurde und es wird auch hier die Eingangsspannung U_E praktisch unverändert an den Ausgang der Stelleinheit weitergegeben.

Damit in diesem dritten Schaltzustand nicht die Eingangsspannung U_E an der im Kurzschlußkreis liegenden weiteren Wicklung 35 anliegt und einen unzulässig hohen Kurzschlußstrom vom Eingangsanschluß 2 zum Eingangsschluß 3 treibt, ist auch hier wieder zwischen dem Leiter 185 und dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 eine Strombegrenzungsschaltung 157 vorgesehen, die prinzipiell wieder durch einen steuerbaren Ein/Aus-Schalter ersetzt werden könnte. Allerdings müßten dann für das Umschalten von einem Schaltzustand in den anderen auch hier wieder Schutzzeiten eingeführt und spezielle Überprüfungsschaltungen vorgesehen werden, damit mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen wird, daß die Schalter 180 und 181 gleichzeitig ge-

geschlossen werden, solange der die Leitungen 185 und 10 miteinander verbindende Schalter geschlossen ist. Vorzugsweise wird daher als Schaltungsanordnung 157 wieder eine Strombegrenzungsschaltung verwendet, die automatisch und ohne zeitliche Verzögerung ein weiteres Ansteigen des durch sie hindurchfließenden Stroms verhindert, wenn dieser Strom einen vorgegebenen Grenzwert zu übersteigen droht.

Auch die Stelleinheit 174 kann in einen vierten Schaltzustand gebracht werden, wie er in der Fig. 9 dargestellt ist. In diesem Schaltzustand sind die beiden Schalter 180 und 181 gleichzeitig geöffnet, wodurch wieder eine starke Drosselwirkung der ersten Wicklung 9 auftritt, die dazu verwendet werden kann, im Fall eines Lastkurzschlusses den Kurzschlußstrom zu begrenzen.

Das Umschalten vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand erfolgt auch hier in der Weise, daß zunächst derjenige der beiden Schalter 180, 181 geschlossen wird, der bis dahin offen war und daß erst danach der bis dahin geschlossene Schalter geöffnet wird. Die Stelleinheit 174 durchläuft also auch hier bei jedem Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand kurzfristig den dritten Schaltzustand.

Damit dann, wenn der dritte Schaltzustand für längere Zeiten aufrechterhalten werden soll, die Verlustleistung besonders klein gehalten werden kann, ist bei dieser Ausführungsform vorgesehen, daß die Strombegrenzungsschaltung 157 über zwei Leitungen 163 von der Schaltersteuerung 23 so angesteuert wird, daß ihr Grenzwert einen wesentlich kleineren Wert,

vorzugsweise den Wert Null annimmt. Die Strombegrenzungsschaltung 157 wirkt dann wie ein geöffneter Schalter und es fließt praktisch nur noch der sehr kleine Kurzschlußstrom, der von dem kleinen Spannungsabfall an der ersten Wicklung 9 in den beiden weiteren Wicklungen 35, 36 getrieben wird.

Die Schalter 180, 181 werden von der Schaltersteuerung 23 über die Leitungen 164, 165 angesteuert.

Auch der Transformator 8 der Stelleinheit 174 weist eine Kurzschlußwicklung 28 auf, die über einen Schalter 29 kurzschließbar ist, der von der Schaltersteuerung 23 über eine Leitung 30 angesteuert wird.

Aufgrund des erfindungsgemäßen Aufbaus ist es bei bestimmten Störfällen möglich, die Stelleinheit 174 zumindest teilweise funktionsfähig zu erhalten oder sie wenigstens so anzusteuern, daß sie ihre Eingangsspannung unverändert an den Ausgangsanschlüssen 5, 6 abgibt. Bildet die Stelleinheit ein Glied in einer längeren Kette von Stelleinheiten, die insgesamt als Spannungskonstanter eingesetzt werden, so bleiben hierdurch wenigstens die übrigen Stelleinheiten funktionsfähig und die gesamte Transformator-schaltung kann, wenn auch im beschränkten Umfang, ihre Steuerungs- bzw. Regelfunktion aufrechterhalten. Dies wird im folgenden für einige typische Störungsfälle erläutert:

1. Kurzschluß im Schalter 180 oder 181:

Ein solcher Kurzschluß bedeutet, daß sich der betreffende Schalter nicht mehr öffnen läßt, die Stelleinheit also dann, wenn sie nicht gemäß der Erfindung ausgebildet wäre, ständig im ersten bzw. zweiten Schaltzustand bleiben würde. Nimmt man an, daß z.B. der Schalter 180 ständig geschlossen ist, so kann aufgrund des Vorhandenseins der Strombegren-

zungsschaltung 157 in all den Fällen, in denen keine additive Aufprägung der in der Wicklung 9 induzierten Spannung gewünscht wird, der Schalter 181 geschlossen und die Strombegrenzungsschaltung 157 auf den kleineren Grenzwert geschaltet werden. Die Stelleinheit geht dann also in den dritten Schaltzustand über und gibt die Eingangsspannung unverändert am Ausgang ab. Wird der Schalter 181 wieder geöffnet und die Strombegrenzungsschaltung 157 wieder auf den größeren Grenzwert zurückgeschaltet, so geht die Stelleinheit wieder in den ersten Schaltzustand über. Sie kann also trotz der Störung immer noch zwischen dem ersten und dem dritten Schaltzustand hin- und hergeschaltet werden und die Amplitude der Ausgangsspannung U_A in entsprechender Weise verändern. Der zweite Schaltzustand kann in einem solchen Fall allerdings nicht mehr hergestellt werden. Entsprechendes gilt, wenn ein Kurzschluß im Schalter 181 auftritt, der Schalter 180 aber funktionsfähig bleibt. In diesem Fall kann die Stelleinheit 174 zwischen dem zweiten und dritten Schaltzustand hin- und hergeschaltet werden, den ersten Schaltzustand aber nicht mehr einnehmen.

2. Gleichzeitiger Kurzschluß in den Schaltern 180 und 181:

In diesem Fall wird die Strombegrenzungsschaltung 157 auf den kleineren Grenzwert geschaltet und die Stelleinheit bleibt auf Dauer im dritten Schaltzustand, in dem die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung ist. In den ersten oder zweiten Schaltzustand kann sie dann allerdings nicht mehr gebracht werden.

3. Sollte ein Kurzschluß gleichzeitig in den beiden Schaltern 180 und 181 und in der Strombegrenzungsschaltung 157 auftreten, so würde zunächst ein sehr hoher Kurzschlußstrom vom Anschluß 2 zum Anschluß 3 fließen. Für diesen Fall ist mit der Strombegrenzungsschaltung 157 eine Sicherung 167 in Reihe geschaltet, die dann durchbrennt und somit die Verbindung zwischen den Leitungen 185 und 10 endgültig unterbricht. Wegen des Kurzschlusses in den beiden Schaltern 180 und 181 befindet sich die Stelleinheit dann im dritten Schaltzustand.
4. Leitungsunterbrechung in der Strombegrenzungsschaltung 157:
Läßt die Strombegrenzungsschaltung 157 aufgrund einer Störung keinen Strom mehr fließen, so werden die Schalter 180 und 181 durch die Schaltersteuerung 23 permanent geschlossen und die Stelleinheit 174 wird auf Dauer in dem sich so ergebenden dritten Schaltzustand gehalten.
5. Leitungsunterbrechung in einem der Schalter 180 bzw. 181
Läßt sich einer der beiden Schalter 180, 181 nicht mehr schließen, so würde immer dann, wenn der jeweils andere Schalter geöffnet werden muß, die oben geschilderte starke Drosselwirkung der Wicklung 9 eintreten. Wegen des Spannungsabfalls, der in diesem Zustand an der Drossel 9 auftritt, würde ein Spannungskonstanter oder Spannungsregler, in dem

eine Stelleinheit diese Störung zeigt, praktisch seine Funktion nicht mehr ausüben können. Um dies zu verhindern, ist die Kurzschlußwicklung 28 vorgesehen, deren Schalter 29 dann geschlossen wird. Damit befindet sich die Stelleinheit 174 wieder im dritten Schaltzustand; sie kann somit weiterhin zwischen dem dritten Schaltzustand und dem einen der beiden anderen Betriebs-Schaltzustände hin- und hergeschaltet werden.

Die eben beschriebenen Störfälle können auch bei der in Fig.8 dargestellten Stelleinheit 144 auftreten und aufgrund ihres erfindungsgemäßen Aufbaus in ähnlicher Weise zum Teil überwunden werden, wie dies eben geschildert wurde. Selbstverständlich kann auch bei der in Fig. 8 dargestellten Stelleinheit 144 eine Sicherung 167 vorgesehen werden, die mit der Strombegrenzungsschaltung 157 in Reihe liegt.

In Fig.10 ist eine Strombegrenzungsschaltung 157 dargestellt, wie sie bei den Stelleinheiten 144, 174 in den Fig. 8 und 9 verwendet werden kann.

Diese Strombegrenzungsschaltung besitzt zwei Stromanschlüsse 187, 188, von denen der eine mit der Leitung 155 bzw. der Leitung 185 und der andere mit dem Anschluß-Verbindungsleiter 10 direkt galvanisch leitend verbunden ist. Zwischen den beiden Stromanschlüssen 187, 188 ist eine Reihenschaltung angeordnet, die aus der Source-Drain-Strecke eines ersten V-MOS-Transistors 190, zwei Widerständen 192, 193 und der Source-Drain-Strecke eines zweiten V-MOS-Transistors 191 besteht. Parallel zu dieser Reihenschaltung sind zwischen die beiden Stromanschlüsse

187, 188 zwei miteinander in Reihe liegende Dioden 198, 199 geschaltet, deren Durchlaßrichtungen einander entgegengesetzt sind. Der Verbindungspunkt 196 der beiden Dioden 198, 199 ist mit dem Verbindungspunkt 195 der beiden Widerstände 192, 193 galvanisch leitend verbunden.

Da jeder der beiden Transistoren 190, 191 eine Diodencharakteristik besitzt, d.h. seine Sperrwirkung nur in einer Richtung entfalten kann, sind die beiden Transistoren 190, 191 so angeordnet, daß ihre Durchlaßrichtungen parallel zu der Durchlaßrichtung der im Parallelzweig liegenden Dioden 198 bzw. 199 und somit einander entgegengerichtet sind. Dadurch kann mit Hilfe dieser Strombegrenzungsschaltung 157 auch ein Wechselstrom in der erforderlichen Weise begrenzt werden.

Die Dioden 198, 199 sind so ausgewählt, daß der an ihnen beim Fließen des Nennstroms auftretende Spannungsabfall kleiner ist als der entsprechende Spannungsabfall am parallelen V-MOS-Transistor 190 bzw. 191. Da jede Diode 198 bzw. 199 nicht nur den zu ihr parallelen V-MOS-Transistor 190 bzw. 191 sondern auch dessen zugehörigen Serienwiderstand 192 bzw. 193 überbrückt, fließen die Halbwellen des zu begrenzenden Wechselstroms entweder über die Diode 198 und weiter über den Widerstand 193 und den V-MOS-Transistor 191 oder über die Diode 199 und weiter über den Widerstand 192 und den V-MOS-Transistor 190. Dadurch kann einerseits der Wechselstrom in jeder Halbwelle durch den einen der beiden V-MOS-Transistoren 190 bzw. 191 in der erforderlichen Weise begrenzt werden; andererseits wird vermieden, daß die Halbwellen auch noch den zweiten

Widerstand und den zweiten V-MOS-Transistor durchfließen müssen, die nur für die Begrenzung der Halbwellen mit dem jeweils anderen Vorzeichen erforderlich sind. Somit kann die in der Strombegrenzungsschaltung 157 auftretende Verlustleistung besonders klein gehalten werden.

Die über die beiden Leitungen 163 von der Schaltersteuerung 23 her zugeführte Gate-Spannung für die beiden Transistoren 190, 191 ist zwischen dem Verbindungspunkt 195 der beiden Widerstände 192, 193 und den beiden Gate-Anschlüssen der Transistoren 190, 191 angelegt. Hierdurch zieht sich die Spannung, die an den Widerständen 192, 193 beim Fließen eines Stroms zwischen den Anschlüssen 187 und 188 abfällt, von der Gate-Spannung ab. Die Größe dieser Gate-Spannung ist so gewählt, daß der Strom, der von einem der beiden Anschlüsse 187, 188 zum jeweils anderen Anschluß fließt, einen vorgegebenen Grenzwert nicht übersteigen kann.

Für den oben beschriebenen Fall, daß die Strombegrenzungsschaltung 157 auf einen zweiten, kleineren Grenzwert geschaltet werden soll, der praktisch gleich Null ist, wird die über die Leitungen 163 zugeführte Gate-Spannung so niedrig gewählt, daß sie unterhalb der Schwellenspannung U_{TH} der V-MOS-Transistoren 190, 191 liegt, die somit praktisch keinen Strom mehr durch ihre Source/Drain-Strecke fließen lassen.

Wie bereits erwähnt, können als Schalter 150 bis 153 bzw. 180 und 181 Triacs verwendet werden. Dies bedeutet jedoch, daß diese Schalter nur dann geöffnet werden können, wenn der durch sie hindurchfließende Strom einen Nulldurchgang durchläuft. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß gemäß der Erfindung beim Übergang von einem Schaltzustand in den anderen zunächst bis dahin offene Schalter geschlossen werden. Dann

befindet sich sowohl die Stelleinheit 144 als auch die Stelleinheit 174 jeweils in ihrem dritten Schaltzustand. Durch die Schalter 150, 151 bzw. 152, 153 bzw. 180, 181 fließt dann der jeweilige Kurzschlußstrom und es kann in den nachfolgenden ersten oder zweiten Schaltzustand nur dann übergegangen werden, wenn dieser Kurzschlußstrom einen Nulldurchgang durchläuft.

Wird dann der betreffende Schalter geöffnet, so liegt die weitere Wicklung 11 bzw. eine der beiden weiteren Wicklungen 35, 36 an ihrer Steuerspannung U_E bzw. U_A , die im Regelfall das Fließen eines Stroms zu erzwingen versucht, der gegen den bis dahin fließenden Kurzschlußstrom phasenverschoben ist, d.h. also in dem Zeitpunkt, in dem der jeweilige Schalter geöffnet wird, keinen Nulldurchgang aufweist.

In Fig. 11 sind in einem Diagramm der Kurvenverlauf einer Schwingungsperiode der Eingangsspannung U_E , des im dritten Schaltzustand fließenden Kurzschlußstroms I_K , des im ersten Schaltzustand fließenden Stroms I_1 sowie des im zweiten Schaltzustand fließenden Stroms I_2 dargestellt. Dabei ist die Amplitude des Kurzschlußstroms I_K der Deutlichkeit halber stark vergrößert dargestellt.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die drei Ströme I_K , I_1 und I_2 nicht gleichzeitig fließen können, da sich die Stelleinheit 144 bzw. 174 immer nur in einem der drei Schaltzustände befinden kann.

Für die folgenden Betrachtungen sei nun angenommen, daß sich die Stelleinheit 144 oder 174 im dritten Schaltzustand befindet, von dem während der in Fig. 11 dargestellten ersten Halbperiode der Eingangsspannung U_E , d.h. also zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_4 in den ersten Schaltzustand übergegangen werden soll.

Hierzu muß bei dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 8 der Schalter 151 und beim Ausführungsbeispiel nach Fig. 9 der Schalter 181 geöffnet werden. Da diese Schalter vom Kurzschlußstrom I_K durchflossen werden, können sie, wenn sie mit Hilfe von Triacs realisiert sind, nur im Zeitpunkt t_4 geöffnet werden, in welchem der Kurzschlußstrom I_K einen Nulldurchgang durchläuft. Man entnimmt der Fig. 11, daß zu diesem Zeitpunkt der Strom I_1 , der im unmittelbaren Anschluß an das Öffnen der Schalter durch die weitere Wicklung 11 bzw. die weitere Wicklung 35 fließen sollte, einen Wert aufweist, der von dem Nulldurchgangswert des Kurzschlußstroms I_K , der vor dem Öffnen durch diese weitere Wicklung 11 bzw. 35 geflossen ist, erheblich verschieden ist.

Es ist klar, daß der im neuen Schaltzustand durch die weitere Wicklung 11 bzw. 35 fließende Strom nicht sprunghaft von Null auf den eigentlich erforderlichen Wert I_S ansteigen kann. Statt dessen wird im Transformator ein Kompensationsstrom I_G induziert, dessen Wert zunächst gleich $-I_S$ ist und der über einen längeren Zeitraum hinweg exponentiell abklingt. Es kann mehrere Schwingungsperioden der Eingangsspannung U_E dauern, bis dieser Kompensationsstrom I_G vollständig verschwunden ist.

Der Kompensationsstrom I_G addiert sich zu dem von der Eingangsspannung U_E getriebenen Strom durch die weitere Wicklung 11 bzw. 35. Da der Transformator 8 so dimensioniert ist, daß der Strom, der durch eine an ihrer Steuerspannung liegende weitere Wicklung normalerweise fließt, knapp unterhalb der Sättigungsgrenze liegt, wird der Transformator durch diesen sich addierenden Kompensationsstrom I_G in die Sättigung getrieben. Dies hat zur Folge, daß sich bei dem eben beschriebenen Schaltvorgang ein Spannungseinbruch ergibt, der

dazu führt, daß der Übergang von der alten auf die neue Spannungsamplitude nicht völlig glatt verläuft, sondern daß auf die erste auf den Schaltvorgang folgende Halbwelle der Ausgangsspannung U_A Spannungsspitzen aufgeprägt sind.

Um diesen störenden Effekt zu vermeiden ist erfindungsgemäß vorgesehen, die Schalter 150 bis 153 und 180, 181 statt mit Triacs ebenfalls mit V-MOS-Transistoren aufzubauen, von denen wieder jeweils zwei mit entgegengesetzter Polung hintereinander geschaltet sind. Diese Transistoren haben den Vorteil, daß der von ihnen gebildete Schalter unabhängig von der Größe des momentan durchfließenden Stroms geöffnet werden kann. Es muß also nicht mehr auf den nächsten Nulldurchgang des Kurzschlußstroms I_K gewartet werden, sondern es kann der Übergang vom dritten in den ersten bzw. zweiten Schaltzustand zu einem wesentlich günstigeren Zeitpunkt stattfinden.

Wie man der Figur 11 entnimmt, wären die optimalen Umschaltzeitpunkte die Zeitpunkte t_2 bzw. t_3 , weil in ihnen der Kurzschlußstrom I_K , der vor dem Umschalten in den betreffenden weiteren Wicklungen fließt, gleich dem Strom ist, der nach dem Umschaltvorgang in der jeweiligen weiteren Wicklung fließen soll.

Da diese idealen Zeitpunkte t_2 bzw. t_3 meßtechnisch nur sehr schwer zu erfassen sind, können sie näherungsweise durch die Zeitpunkte t_2' bzw. t_3' ersetzt werden, in denen der Strom, der die weitere Wicklung im ersten bzw. im zweiten Schaltzustand durchfließt, einen Nulldurchgang aufweist. Diese Ersatzzeitpunkte t_2' bzw. t_3' sind von den idealen Zeitpunkten t_2 bzw. t_3 nicht allzu weit entfernt. Da, wie bereits erwähnt, die

Amplitude von I_K in Fig. 11 stark übertrieben dargestellt ist, ist die bei Verwendung der Ersatzzeitpunkte t_2' bzw. t_3' erforderliche Stromänderung auch nicht besonders groß.

Da die Zeitabstände τ_1 bzw. τ_2 , die die Ersatzzeitpunkte t_2' bzw. t_3' vom nächstliegenden Nulldurchgang der Eingangsspannung U_E aufweisen, lastabhängig sind, können sie nicht ein für allemal in der Schaltersteuerung 23 gespeichert werden. Statt dessen werden sie immer dann, wenn sich die Stelleinheit 144 bzw. 174 im ersten bzw. zweiten Schaltzustand befindet, gemessen und die Meßwerte werden gespeichert. Soll dann das nächste Mal vom dritten Schaltzustand in den ersten bzw. zweiten Schaltzustand übergegangen werden, so kann ausgehend von der Zeit, die seit dem Nulldurchgang t_1 der Eingangsspannung U_E verstrichen ist, auf den der Schaltvorgang folgen soll, der Schaltzeitpunkt t_2' bzw. der Schaltzeitpunkt t_3' ohne weiteres vorgegeben werden.

Durch diese Maßnahmen läßt sich erreichen, daß die Ausgangsspannung der Stelleinheit bereits bei der nächsten Halbschwingung den neuen Amplitudenwert in völlig ungestörter Weise durchläuft.

Soll eine Stelleinheit, die mit V-MOS-Transistor-Schaltern und einer Strombegrenzungsschaltung 157 ausgestattet ist und die im ersten Schaltzustand auf ihre Eingangsspannung eine Spannungsänderung $+\Delta U$ aufprägt und im zweiten Schaltzustand eine Spannungsänderung von $-\Delta U$ bewirkt, vom ersten in den zweiten Schaltzustand oder umgekehrt umgeschaltet werden, so läßt sich die dabei insgesamt auftretende Spannungsänderung $2\Delta U$ in zwei Schritten durchführen; der erste Schritt, bei dem die Ausgangsspannung um ΔU geändert wird, erfolgt sofort,

d.h. gleichzeitig mit der Erzeugung des Umschaltsignals. Dies geschieht dadurch, daß durch Schließen eines oder mehrerer bis dahin offener Schalter die Stelleinheit in den dritten Schaltzustand übergeführt wird. Die zweite Hälfte der erforderlichen Änderung wird dann innerhalb eines Zeitraumes bewerkstelligt, der im ungünstigsten Fall gleich einer halben Schwingungsperiode der Eingangsspannung U_E ist. Nimmt man an, daß U_E eine Schwingungsfrequenz von 50 Hz besitzt, so läßt sich also die Gesamtänderung innerhalb von höchstens 10 ms bewerkstelligen. Danach hat die Ausgangsspannung U_A stabil ihren neuen Wert.

Entsprechendes gilt auch dann, wenn eine Stelleinheit in den ersten oder zweiten Schaltzustand übergeführt werden soll, nachdem sie sich längere Zeit im dritten Schaltzustand befunden hat. Da bei einem solchen Übergang nur ein bzw. zwei Schalter geöffnet werden müssen, muß nach der Erzeugung des Umschaltsignals lediglich gewartet werden, bis der nächste günstige Schaltzeitpunkt t_2' bzw. t_3' auftritt. Da jeder dieser Zeitpunkte pro Wechselspannungsperiode zweimal zur Verfügung steht, muß also im ungünstigsten Fall eine Zeitdauer abgewartet werden, die der Länge einer Halbperiode der Wechselspannung entspricht, bis umgeschaltet werden kann. Zwar erfolgt hier die Änderung der Ausgangsspannung in einem einzigen Schritt, doch ist die Größe dieser Änderung auch nur halb so groß wie die Gesamtänderung, die beim Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand durchlaufen wird.

Ein besonders schnelles und präzises Umschalten ergibt sich dann, wenn jeweils zwei der oben beschriebenen Stelleinheiten 174 zur Bildung eines Stelleinheiten-Paares miteinander in Reihe geschaltet werden.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Transformatorschaltung zur Erzeugung einer einstellbaren, an einer Last liegenden Lastspannung aus einer Versorgungsspannung, die von einer Spannungsquelle geliefert wird, wobei die Transformatorschaltung wenigstens eine Stelleinheit umfaßt, die zwei Eingangsanschlüsse zum Anlegen einer Eingangswechselspannung, zwei Ausgangsanschlüsse zum Abgeben einer Ausgangswechselspannung, einen mit den Eingangs- und Ausgangsanschlüssen verbundenen Transformator sowie Schalter umfaßt, die zur Veränderung der Amplitude der Ausgangswechselspannung der Stelleinheit betätigbar sind, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß einer (3) der beiden Eingangsanschlüsse (2, 3) der Stelleinheit (4; 34; 54; 94; 144; 174) durch einen Anschluß-Verbindungsleiter (10) mit einem (6) der beiden Ausgangsanschlüsse (5, 6) direkt galvanisch leitend verbunden ist, daß zwischen den anderen Eingangsanschluß (2) und den anderen Ausgangsanschluß (5) eine erste Wicklung (9) des Transformators (8) geschaltet ist, und daß der Transformator (8) wenigstens eine weitere Wicklung (11; 35) umfaßt, deren Windungsverhältnis (w_w/w_1) zur ersten Wicklung (9) größer 1 ist und an die mit Hilfe der Schalter (15, 16; 37; 98; 150, 153; 180) wenigstens eine erste Steuer-Wechselspannung anlegbar ist, um in der ersten Wicklung (9) eine erste Spannung (ΔU_1) zu induzieren, die sich der Eingangswechselspannung (U_E) so aufprägt, daß sich die Amplitude der Ausgangswechselspannung um die Amplitude der induzierten Spannung (ΔU_1) von der Amplitude der Eingangswechselspannung (U_E) unterscheidet.
2. Transformatorschaltung nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß an die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit Hilfe von Schaltern (15; 150, 153)

eine erste Steuer-Wechselspannung anlegbar ist, um in der ersten Wicklung (9) eine Spannung (ΔU_1) zu induzieren, die sich der Eingangswechselspannung (U_E) additiv aufprägt, und daß an die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit Hilfe von Schaltern (16; 151; 152) eine zweite Steuer-Wechselspannung anlegbar ist, um in der ersten Wicklung (9) eine Spannung (ΔU_2) zu induzieren, die sich der Eingangswechselspannung (U_E) subtraktiv aufprägt.

3. Transformatorschaltung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Steuerspannung die Eingangswechselspannung (U_E) der Stelleinheit (4; 144) ist und daß die zweite Steuerspannung die Ausgangswechselspannung (U_A) der Stelleinheit (4; 144) ist.
4. Transformatorschaltung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit Hilfe einer Schalteranordnung (17) kurzschließbar ist, um den Spannungsabfall an der vom Laststrom durchflossenen ersten Wicklung (9) möglichst gleich Null zu machen, so daß die Amplitude der Ausgangsspannung (U_A) gleich der Amplitude der Eingangsspannung (U_E) der Stelleinheit (4) ist.
5. Transformatorschaltung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das eine Ende (13) der wenigstens einen weiteren Wicklung (11) mit Hilfe eines ersten Schalters (150) direkt mit dem Eingangsanschluß (2) der Stelleinheit (144) verbindbar ist, mit dem die erste Wicklung (9) verbunden ist, daß das andere Ende (14) der wenigstens einen weiteren Wicklung (11) mit Hilfe eines zweiten Schalters (151) direkt mit dem Ausgangsanschluß (5) der Stelleinheit (144) verbindbar ist, mit dem die erste Wicklung (9) verbunden ist, daß jedes der beiden Enden (13, 14) der wenigstens einen weiteren

Wicklung (11) über einen dritten Schalter (152) bzw. einen vierten Schalter (153) mit dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) verbindbar ist, und daß die Stelleinheit (144) mit Hilfe dieser Schalter (150, 151, 152, 153) in die drei folgenden Schaltzustände bringbar ist:

- einen ersten Schaltzustand, in dem die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit einem solchen Wicklungssinn an die Eingangsspannung (U_E) der Stelleinheit (144) gelegt ist, daß sich die hierdurch in der ersten Wicklung (9) induzierte Spannung (ΔU_1) additiv auf die Eingangsspannung (U_E) aufprägt,
- einen zweiten Schaltzustand, in dem die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit einem solchen Wicklungssinn an die Ausgangsspannung (U_A) der Stelleinheit (144) gelegt ist, daß sich die hierdurch in der ersten Wicklung (9) induzierte Spannung (ΔU_2) subtraktiv auf die Eingangsspannung (U_E) aufprägt, und
- einen dritten Schaltzustand, in dem jeweils ein Ende (13, 14) der wenigstens einen weiteren Wicklung (11) mit einem Ende der ersten Wicklung (9) elektrisch leitend verbunden ist, wodurch die wenigstens eine weitere Wicklung (11) gemeinsam mit dem ersten geschlossenen Schalter (150) und dem zweiten geschlossenen Schalter (151) einen zur ersten Wicklung (9) parallelen Strompfad bildet, wodurch der resultierende magnetische Fluß im Kern (12) des Transformators (8) zumindest näherungsweise gleich Null und somit die Ausgangsspannung (U_A) der Stelleinheit (144) gleich der Eingangsspannung (U_E) ist.

6. Transformatorschaltung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der dritte und vierte Schalter (152, 153) jeweils in der Weise als Strombegrenzungsschaltung ausgebildet sind, daß sie im geschlossenen Zustand dem durch sie hindurchfließenden Strom

nur einen kleinen, konstanten Widerstand entgegensetzen, solange dieser Strom kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist und daß dieser Grenzwert etwas größer als der Strom gewählt ist, der im ersten oder im zweiten Schaltzustand durch die weitere Wicklung (11) fließt.

7. Transformatorschaltung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der dritte und vierte Schalter (152, 153) durch einen weiteren elektrischen Leiter (155) direkt galvanisch leitend miteinander verbunden sind, daß zwischen dem weiteren elektrischen Leiter (155), der den dritten und vierten Schalter (152, 153) miteinander verbindet, und dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) eine Schaltungsanordnung (157) vorgesehen ist, die die beiden Leiter (155, 10) elektrisch leitend miteinander verbindet und das Fließen eines unzulässig großen Stroms verhindert, daß die Umschaltung von einem Schaltzustand in einen anderen so erfolgt, daß der dritte und vierte Schalter (152, 153) niemals gleichzeitig geschlossen sind, und daß der Strompfad (152, 155, 153), der die beiden Ende (13, 14) der weiteren Wicklung (11) miteinander verbindet, wenn der dritte und vierte Schalter (152, 153) gleichzeitig geschlossen sind, einen elektrischen Widerstandswert besitzt, der größer als der ohmsche Widerstand der weiteren Wicklung (11) ist.

8. Transformatorschaltung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß an die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit Hilfe von Schaltern (98) wahlweise eine von mehreren Steuerspannungen ($U_{S1}, \dots, U_{S32}$) anlegbar ist, die sich zumindest teilweise in ihrer Amplitude voneinander unterscheiden, um in der ersten Wicklung (9) wahlweise jeweils eine Spannung ($\Delta U_1, \dots, \Delta U_{32}$) zu induzieren, die sich der Eingangswechselspannung (U_E)

der Stelleinheit (94) so aufprägt, daß sich die Amplitude der Ausgangswechselspannung (U_A) um die Amplitude der jeweils induzierten Spannung ($\Delta U_1, \dots, \Delta U_{32}$) von der Amplitude der Eingangswechselspannung (U_E) unterscheidet.

9. Transformatorschaltung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die wenigstens eine weitere Wicklung (11) mit Hilfe der Schalteranordnung (98) kurzschließbar ist, um den Spannungsabfall an der vom Laststrom durchflossenen ersten Wicklung (9) möglichst gleich Null zu machen, so daß die Amplitude der Ausgangsspannung (U_A) gleich der Amplitude der Eingangsspannung (U_E) der Stelleinheit (94) ist.
10. Transformatorschaltung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß die mehreren Steuerspannungen ($U_{S1}, \dots, U_{S32}$) in zwei Gruppen ($U_{S1}, U_{S3}, \dots, U_{S31}$ und $U_{S2}, U_{S4}, \dots, U_{S32}$) so unterteilt sind, daß die Steuerspannungen, die zur gleichen Gruppe gehören, alle voneinander verschiedene Amplituden besitzen, während jede Steuerspannung ($U_{S1}, U_{S3}, \dots, U_{S31}$) aus der einen Gruppe einer Steuerspannung ($U_{S2}, U_{S4}, \dots, U_{S32}$) aus der anderen Gruppe hinsichtlich der Amplitude zumindest näherungsweise gleich ist, daß die Steuerspannungen ($U_{S1}, U_{S3}, \dots, U_{S31}$) der einen Gruppe so an die wenigstens eine weitere Wicklung (11) anlegbar sind, daß sich die dabei induzierten Spannungen ($\Delta U_1, \Delta U_3, \dots, \Delta U_{31}$) additiv auf die Eingangsspannung (U_E) der Stelleinheit (94) aufprägen und daß die Steuerspannungen ($U_{S2}, \dots, U_{S32}$) der anderen Gruppe so an die wenigstens eine weitere Wicklung (11) anlegbar sind, daß sich die dabei induzierten Spannungen ($\Delta U_2, \Delta U_4, \dots, \Delta U_{32}$) subtraktiv auf die Eingangsspannung (U_E) aufprägen.

11. Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß eine Wechselspannungsquelle (100) vorgesehen ist, die mehrere Abgriffe (121, ..., 127) aufweist, an denen gleichzeitig mehrere Abgriffswechselspannungen (U_{X1} , ..., U_{X6}) zur Verfügung stehen, deren Amplituden so gewählt sind, daß jede der Steuerspannungen (U_{S1} , ..., U_{S32}) entweder gleich einer dieser Abgriffswechselspannungen oder gleich der Summe von mehreren dieser Abgriffswechselspannungen (U_{X1} , ..., U_{X6}) ist, und daß wenigstens eines der beiden Enden der weiteren Wicklung (11) mit Hilfe von Schaltern (98) wahlweise mit verschiedenen dieser Abgriffe (121, ..., 127) verbindbar ist.
12. Transformatorschaltung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die zur Induzierung der kleinsten gewünschten von Null verschiedenen Spannung (ΔU_{min}) in der ersten Wicklung (9) des Transformators (8) erforderliche Steuerspannung (U_{Smin}) als kleinste Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}) an wenigstens einem Paar von einander direkt benachbarten Abgriffen (126, 127) der Wechselspannungsquelle (100) abgreifbar ist, daß die zwischen den anderen Paaren einander direkt benachbarter Abgriffe (121, ..., 126) abgreifbaren Abgriffswechselspannungen (U_{X1} , ..., U_{X5}) entweder gleich dieser kleinsten Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}) oder gleich einem ganzzahligen Vielfachen dieser kleinsten Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}) sind, und daß die Anzahl der Abgriffe (121, ..., 127), die Anzahl der Abgriffspaare (126, 127; 122, 123), zwischen denen die kleinste Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}) abgreifbar ist, und die Größen der ganzzahligen Vielfachen der kleinsten Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}), die zwischen den übrigen Paaren zueinander unmittelbar benachbarter Abgriffe (121, 122; 123, 124; 124, 125; 125, 126) abgreifbar sind, so gewählt sind, daß bei minimaler Anzahl von

Abgriffen (121, ..., 127) ein vorgegebbarer maximaler Steuer-
spannungsbereich (U_{Smax}) in Einheitsschritten der klein-
sten Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}) überdeckbar ist.

13. Transformatorschaltung nach Anspruch 12, dadurch g e -
k e n n z e i c h n e t , daß die Anzahl der Abgriffe (121,
..., 127), die Anzahl der Abgriffspaare (126, 127; 122, 123),
zwischen denen die kleinste Abgriffswechselspannung (U_{Xmin})
abgreifbar ist, und die Größen der ganzzahligen Vielfachen
der kleinsten Abgriffswechselspannung (U_{Xmin}), die zwischen
den übrigen Paaren zueinander unmittelbar benachbarter
Abgriffe abgreifbar sind, so gewählt sind, daß überdies
die maximale Spannung, die an der Wechselspannungsquelle
(100) abgreifbar ist, gleich der für die Induzierung der
gewünschten maximalen Spannung (ΔU_{max}) in der ersten
Wicklung (9) des Transformators (8) erforderlichen maxima-
len Steuerspannung (U_{Smax}) ist.
14. Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 11 bis 13,
dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß die Wechsel-
spannungsquelle (100) eine Wicklung einer Zusatz-Trans-
formatoranordnung (101) ist, an die eine Wechselspannung
angelegt ist und die in mehrere Wicklungsabschnitte (104,
..., 109) unterteilt ist, zwischen denen die Abgriffe
(121, ..., 127) zum Abgreifen der Abgriffswechselspannungen
(U_{X1} , ..., U_{X6}) herausgeführt sind, und daß die Wechsel-
spannung, die an die Wicklung der Zusatz-Transformator-
anordnung (101) anlegbar ist, die Eingangsspannung (U_E) oder
die Ausgangsspannung (U_A) der Stelleinheit (94) ist.
15. Transformatorschaltung nach Anspruch 1, dadurch g e -
k e n n z e i c h n e t , daß der Transformator (8) wenig-
stens zwei weitere Wicklungen (35, 36) aufweist, an die
mit Hilfe der Schalter (37, 38; 180, 181) jeweils eine

Steuer-Wechselspannung anlegbar ist, um in der ersten Wicklung (9) eine Spannung (ΔU_1 bzw. ΔU_2) zu induzieren, die sich der Eingangswechselspannung (U_E) aufprägt.

16. Transformatorschaltung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß an die beiden weiteren Wicklungen (35, 36) nur alternierend eine Steuerspannung anlegbar ist, und daß die durch Anlegen einer Steuerspannung an die eine weitere Wicklung (35) in der ersten Wicklung (9) induzierte erste Spannung (ΔU_1) eine Amplitude aufweist, deren Absolutbetrag in etwa gleich dem Absolutbetrag der Amplitude der durch Anlegen einer Steuerspannung an die andere weitere Wicklung (36) in der ersten Wicklung (9) induzierten zweiten Spannung (ΔU_2) ist.
17. Transformatorschaltung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden induzierten Spannungen (ΔU_1 , ΔU_2) auf die Eingangsspannung (U_E) mit entgegengesetztem Vorzeichen aufprägbar sind, so daß die Amplitude der Ausgangswechselspannung (U_A) in dem einen Fall gleich der Summe ($U_E + \Delta U_1$) und im anderen Fall gleich der Differenz ($U_E - \Delta U_2$) der Amplituden der Eingangswechselspannung (U_E) und der betreffenden induzierten Spannung (ΔU_1 , ΔU_2) ist, und daß zum additiven Aufprägen einer induzierten Spannung (ΔU_1) die Eingangswechselspannung (U_E) der Stelleinheit (34; 54, 54'; 174) und zum subtraktiven Aufprägen einer induzierten Spannung (ΔU_2) die Ausgangswechselspannung (U_A) der Stelleinheit (34; 54, 54'; 174) als die jeweilige Steuer-Wechselspannung Verwendung findet.
18. Transformatorschaltung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Transformator (8) zwei weitere Wicklungen (35, 35', 36, 36') umfaßt, von denen

eine nur als addierende Wicklung (35, 35') Verwendung findet, die mit ihrem ersten Ende ständig mit einem (2) der beiden Eingangsanschlüsse (2, 3) der Stelleinheit (34; 54, 54'; 174) direkt galvanisch verbunden ist, und deren zweites Ende mit Hilfe eines Schalters (37, 37'; 180) mit dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) leitend verbindbar bzw. von diesem trennbar ist, und von denen die andere nur als subtrahierende Wicklung (36, 36') Verwendung findet, die mit ihrem ersten Ende ständig mit einem (5) der beiden Ausgangsanschlüsse (5, 6) der Stelleinheit (34; 54, 54'; 174) direkt galvanisch leitend verbunden ist; während ihr zweites Ende mit Hilfe eines Schalters (38, 38'; 181) mit dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) leitend verbindbar bzw. von diesem trennbar ist, und daß das Windungsverhältnis der ersten Wicklung (9) des Transformators (8) zur addierenden Wicklung (35, 35') in etwa gleich dem Windungsverhältnis der ersten Wicklung (9) zur subtrahierenden Wicklung (36, 36') ist.

19. Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 15 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden weiteren Wicklungen (35, 36) mit Hilfe von Schaltern (31, 32) gleichzeitig kurzschließbar sind, um den Spannungsabfall an der vom Laststrom durchflossenen ersten Wicklung (9) möglichst gleich Null zu machen, so daß die Amplitude der Ausgangswechselspannung (U_A) gleich der Amplitude der Eingangswechselspannung (U_E) der Stelleinheit ist, daß die beiden Schalter (37, 37', 38, 38'), die zum Anlegen einer Steuer-Wechselspannung an jeweils eine der beiden weiteren Wicklungen (35, 35', 36, 36') dienen, exklusiv betätigbar und zwischen dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) und dem betreffenden Ende der zugehörigen weiteren Wicklung (35, 35', 36, 36') angeordnet sind, daß an jedem der beiden Schalter (37, 37', 38, 38') eine Sensoreinheit (42, 42') angeordnet ist, die ein Signal abgibt, das den

Schaltzustand des zugehörigen Schalters (37, 37', 38, 38') kennzeichnet, und daß jedem der beiden Schalter (37, 37', 38, 38') eine Sperrschaltung (39, 39', 40, 40') zugeordnet ist, die in Abhängigkeit von dem Signal, das von der Sensoreinheit des jeweils anderen Schalters (39, 39', 40, 40') abgegeben wird, das Schließen des ihr zugeordneten Schalters (39, 39', 40, 40') verhindert, so lange der jeweils andere Schalter (39, 39', 40, 40') geschlossen ist.

20. Transormatorschaltung nach einem der Ansprüche 15 bis 19, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß eine Sensoreinrichtung zum Erfassen des Phasenverlaufes des Magnetflusses in der ersten Wicklung (9) vorgesehen ist, daß die Schalter (37, 38, 37', 38'), die jeweils zum Anlegen einer Steuerspannung an die weitere Wicklung (35, 36, 35', 36') dienen, in Abhängigkeit vom Meßsignal der Sensoreinrichtung nur bei solchen Phasenwinkeln des Magnetflusses in der ersten Wicklung (9) schließbar sind, bei denen dieses Schließen zu einer möglichst kleinen Änderung dieses Magnetflusses führt, und daß diese Schalter (37, 38, 37', 38') nur beim Nulldurchgang des durch die weitere Wicklung (35, 36, 35', 36') fließenden Stroms geöffnet werden.
21. Transformatorschaltung nach Anspruch 20, dadurch g e - k e n n z e i c h n e t , daß der Transformator (8) eine mit Hilfe eines Schalters (29) kurzschließbare Kurzschlußwicklung (28) aufweist, daß der Schalter (29) für die Kurzschlußwicklung (28) während der Zeitspannen geschlossen ist, in denen beim Umschalten von einer Steuerspannung auf eine andere Steuerspannung vorübergehend keine Steuerspannung an einer weiteren Wicklung (11) anliegt, daß der Schalter (29) für die Kurzschlußwicklung (28) nur bei solchen Phasenwinkeln des Magnetflusses durch die erste Wicklung (9) geschlossen wird, bei denen dieses

Schließen zu einer möglichst kleinen Änderung dieses Magnetflusses führt, und daß dieser Schalter (29) nur beim Nulldurchgang des durch die Kurzschlußwicklung (28) fließenden Stroms geöffnet wird.

22. Transformatorschaltung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden zweiten Enden der beiden weiteren Wicklungen (35, 36) mit Hilfe der Schalter (180, 181) miteinander direkt galvanisch leitend so verbindbar sind, daß die beiden weiteren Wicklungen (35, 36) hintereinander in einem zur ersten Wicklung (9) elektrisch parallelen Strompfad liegen.
23. Transformatorschaltung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Schalter (180, 181), durch die die zweiten Enden der beiden weiteren Wicklungen (35, 36) mit dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) verbindbar sind, durch einen weiteren elektrischen Leiter (185) direkt galvanisch leitend miteinander verbunden sind und daß zwischen diesem Leiter (185) und dem Anschluß-Verbindungsleiter (10) eine Schaltungsanordnung (157) vorgesehen ist, die die beiden Leiter (185, 10) elektrisch leitend miteinander verbindet und das Fließen eines unzulässig großen Stroms verhindert.
24. Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 7 oder 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltungsanordnung (157) eine Strombegrenzungsschaltung ist, die dem durch sie hindurchfließenden Strom einen kleinen, konstanten Widerstand entgegensetzt, solange dieser Strom kleiner als ein veränderlich vorgebbarer Grenzwert ist und daß der Grenzwert etwas größer als der Strom gewählt ist, der im ersten oder im zweiten Schaltzustand durch die jeweils an einer Steuerspannung liegende weitere Wicklung (11; 35, 36) fließt.

25. Transformatorschaltung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Strombegrenzungsschaltung für Zeiträume, in denen sich die Stelleinheit längerfristig im dritten Schaltzustand befindet, auf einen zweiten Grenzwert umschaltbar ist, der wesentlich kleiner als der erste Grenzwert, insbesondere gleich Null ist.
26. Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 6 oder 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Strombegrenzungsschaltung den durch sie hindurchfließenden Strom bei Annäherung an den Grenzwert mit einem stetigen Übergang auf diesen Grenzwert einregelt.
27. Transformatorschaltung nach Anspruch 6 oder einem der Ansprüche 24 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Strombegrenzungsschaltung (157) folgende Bestandteile umfaßt:
- zwei V-MOS-Transistoren (190, 191), deren Source/Drain-Strecken mit einander entgegengesetzter Polung in Reihe geschaltet sind,
 - zwei Widerstände (192, 193), die miteinander und mit den Source/Drain-Strecken der beiden Transistoren (190, 191) in Reihe zwischen die beiden Transistoren (190, 191) geschaltet sind, wobei die Gate-Spannung für die beiden Transistoren (190, 191) zwischen dem Verbindungspunkt (195) der beiden Widerstände (192, 193) und dem jeweiligen Gate-Anschluß angelegt ist, und
 - zwei Dioden (198, 199), die mit einander entgegengesetzter Polung in Reihe zwischen die beiden Stromanschlüsse (187, 188) der Strombegrenzungsschaltung (157) geschaltet sind und deren Verbindungspunkt (196) elektrisch direkt leitend mit dem Verbindungspunkt (195) der beiden Widerstände (192, 193) verbunden ist, wobei die Durchlaßrichtung einer jeden Diode (198, 199) gleich der permanenten Durch-

laßrichtung des im jeweiligen Parallelzweig liegenden V-MOS-Transistors (190, 191) ist.

28. Transformatorschaltung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Windungsverhältnis einer jeden weiteren Wicklung (11; 35, 36, 35', 36') des Transformators (8) zur ersten Wicklung (9) in einem Bereich von 3 : 1 bis 200 : 1 liegt.
29. Transformatorschaltung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Transformatorschaltung wenigsten zwei Stufen (55, 56, 57) umfaßt, von denen jede aus wenigstens einer Stelleinheit (4; 34; 54, 54'; 144; 174) besteht und die so miteinander in Reihe geschaltet sind, daß die Ausgangsspannung (U_A) der vorderen Stufe (55, 56) die Eingangsspannung (U_E) der hinteren Stufe (56, 57) ist, und daß die wenigstens zwei ersten Wicklungen (9) der Transformatoren (8) der wenigstens zwei Stufen (55, 56, 57) direkt miteinander in Reihe liegen.
30. Transformatorschaltung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß jede Stufe (55, 56, 57) wenigstens zwei Stelleinheiten (54, 54'; 174, 174') umfaßt, die ein Stelleinheiten-Paar bilden, wobei die Windungsverhältnisse der jeweiligen ersten Wicklung (9, 9') zu den zugehörigen weiteren Wicklungen (35, 36, 35', 36') so aufeinander abgestimmt sind, daß die Ausgangsspannung (U_{AP}) des Stelleinheiten-Paares (54, 54'; 174, 174') gleich der Eingangsspannung (U_{EP}) des Stelleinheiten-Paares (54, 54'; 174, 174') ist, wenn die eine (54; 174) der Stelleinheiten auf ihre Eingangsspannung (U_{EP}) eine induzierte Spannung (ΔU_1) additiv und die andere Stelleinheit (54'; 174') auf ihre Eingangsspannung (U_E) eine induzierte Spannung (ΔU_2) subtraktiv aufprägt.

31. Transformatorschaltung nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die Absolutwerte der zumindest durch einige der Stufen (55, 56, 57) erzeugbaren Amplitudendifferenzen zueinander im Verhältnis ganzzahliger Dreierpotenzen $1 : 3 : 9 : \text{usw.}$ stehen.
32. Schaltungsanordnung mit einer Transformatorschaltung nach einem oder mehreren der Ansprüche 29 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß eine Wechselspannungs-Meßfühleranordnung (64, 67; 81), eine die Ausgangssignale der Meßfühleranordnung mit Referenzwerten ($U_{\text{ref1}}, U_{\text{ref2}}; U_{\text{ref}}$) vergleichende Komparatoranordnung (63, 66; 82) und eine Schaltersteuerung (23; 83) vorgesehen sind, durch die die Schalter der Stufen (55, 56, 57) selektiv so betätigbar sind, daß der Last (7) eine Lastspannung (U_L) mit möglichst konstanter Amplitude zugeführt wird.
33. Schaltungsanordnung nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßfühleranordnung einen Meßfühler (67; 81), der die von der Spannungsquelle (1; 80) abgegebene Versorgungsspannung (U_V) mißt, und/oder einen Meßfühler (64) umfaßt, der die Lastspannung (U_L) mißt.
34. Schaltungsanordnung nach einem der Ansprüche 32 oder 33, dadurch gekennzeichnet, daß für jeden der Phasenleiter (R, S, T) eines Mehrphasensystems eine Transformatorschaltung (75, 76, 77) mit einer oder mehreren Stufen (55, 56, 57), eine die Spannung auf jedem der Phasenleiter (R, S, T oder R_K, S_K, T_K) messende Meßfühleranordnung (81), eine die Ausgangssignale der Meßfühleranordnung (81) mit wenigstens einem Referenzwert (U_{ref}) vergleichende Komparatoranordnung (82) sowie eine Schaltersteuerung (83) vorgesehen sind, die aufgrund der

von der Komparatoranordnung (82) abgegebenen Differenzsignale die Schalter der Stufen (55, 56, 57) aller Transformatorschaltungen (75, 76, 77) steuert.

35. Transformatorschaltung für ein Mehrphasensystem mit Null-Leiter, nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sie für jede Phase wenigstens eine Stelleinheit (4; 34; 54; 144; 174) umfaßt, deren erste Wicklung (9) jeweils in dem betreffenden Phasenleiter liegt und deren Anschluß-Verbindungsleiter (10) mit dem Null-Leiter des Mehrphasensystems verbunden ist.
36. Transformatorschaltung für ein Mehrphasensystem ohne Null-Leiter nach einem der Ansprüche 1 bis 34, dadurch gekennzeichnet, daß sie für jede Phase wenigstens eine Stelleinheit (4; 34; 54; 144; 174) umfaßt, deren erste Wicklung (9) jeweils in dem betreffenden Phasenleiter liegt, und daß die Anschluß-Verbindungsleiter (10) aller Stelleinheiten zur Bildung eines künstlichen Null-Leiters miteinander verbunden sind.
37. Transformatorschaltung für ein Mehrphasensystem ohne Null-Leiter nach einem der Ansprüche 1 bis 34, dadurch gekennzeichnet, daß sie für jede Phase wenigstens eine Stelleinheit (4; 34; 54; 144; 174) umfaßt und daß die zu verschiedenen Phasen gehörenden Stelleinheiten in verketteter Schaltung angeordnet sind, wobei für jede Stelleinheit die erste Wicklung im zugehörigen Phasenleiter liegt und der Anschluß-Verbindungsleiter (10) von einem der anderen Phasenleiter gebildet wird.
38. Verfahren zur Regelung der Amplitude einer Wechselspannung unter Verwendung einer Schaltungsanordnung nach einem der Ansprüche 32 bis 34, dadurch gekennzeichnet,

daß der Absolutwert der kleinstmöglichen Amplitudenänderung (A) zwischen dem 1,0-fachen und dem 2,0-fachen des Absolutwertes der zulässigen Abweichung (δ) der Lastspannung (U_L) vom Sollwert (S_L) liegt und daß die Schaltschwellen, bei denen bei zunehmender Abweichung der von der Spannungsquelle abgegebenen Versorgungsspannung (U_V) von der Nennwechselspannung die aufgeprägte Amplitudendifferenz vom n -fachen der kleinstmöglichen Amplitudenänderung (A) auf das $(n+1)$ -fache, und bei abnehmender Abweichung vom $(n+1)$ -fachen auf das n -fache umgeschaltet wird, so gewählt sind, daß die Amplitudenwerte der Lastspannung (U_L) bei stetigem Durchlauf der Versorgungsspannung (U_V) durch die jeweilige Schaltschwelle vor und nach dem Umschalten symmetrisch zum Sollwert (S_L) liegen.

39. Verfahren nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Lastspannung (U_L) auf einen Sollwert (S_L) eingeregelt wird, der vom Nennwert (U_{Vnenn}) der Versorgungsspannung (U_V) verschieden ist.
40. Verfahren zum Umschalten einer Stelleinheit einer Transformatorschaltung nach einem der Ansprüche 6 oder 23 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang vom ersten in den zweiten oder vom zweiten in den ersten Schaltzustand jeweils unter kurzzeitiger Zwischenschaltung des dritten Schaltzustandes erfolgt.
41. Verfahren nach Anspruch 40 für eine Transformatorschaltung nach Anspruch 6 oder einem der Ansprüche 24 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß beim Übergang vom ersten Schaltzustand, in dem der erste Schalter (150) und der vierte Schalter (153) geschlossen und der zweite Schalter (151) und der dritte Schalter (152) geöffnet sind, in den zweiten Schaltzustand, in dem der zweite Schalter

(151) und der dritte Schalter (152) geschlossen und der erste Schalter (150) und der vierte Schalter (153) geöffnet sind, zuerst der zweite Schalter (151) und der dritte Schalter (152) geschlossen und dann der erste Schalter (150) und der vierte Schalter (153) geöffnet werden, un daß beim Übergang vom zweiten in den ersten Schaltzustand zuerst der erste Schalter (150) und der vierte Schalter (153) geschlossen und dann der zweite Schalter (151) und der dritte Schalter (152) geöffnet werden.

42. Verfahren nach Anspruch 40 für eine Transformatorschaltung nach Anspruch 7 und einem der Ansprüche 23 bis 27, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß beim Übergang vom ersten Schaltzustand in den zweiten Schaltzustand zuerst der zweite Schalter (151) geschlossen, dann der vierte Schalter (153) geöffnet, dann der dritte Schalter (152) geschlossen und dann der erste Schalter (150) geöffnet wird und daß beim Übergang vom zweiten in den ersten Schaltzustand zuerst der erste Schalter (150) geschlossen, dann der dritte Schalter (152) geöffnet, dann der vierte Schalter (153) geschlossen und dann der zweite Schalter (151) geöffnet wird.
43. Verfahren nach Anspruch 40 für eine Transformatorschaltung nach Anspruch 23 und einem der Ansprüche 24 bis 27, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß beim Übergang vom ersten Schaltzustand, in dem der Schalter (180), der mit dem zweiten Ende der addierenden weiteren Wicklung (35) verbunden ist, geschlossen und der Schalter (181), der mit dem zweiten Ende der subtrahierenden weiteren Wicklung (36) verbunden ist, geöffnet ist, zuerst der Schalter (181) für die subtrahierende Wicklung (36) geschlossen und danach der Schalter (180) für die addierende Wicklung (35) geöffnet wird, und daß beim Übergang vom zweiten in den

ersten Schaltzustand zuerst der Schalter (180) für die addierende Wicklung (35) geschlossen und danach der Schalter (181) für die subtrahierende Wicklung (36) geöffnet wird.

44. Verfahren nach einem der Ansprüche 40 bis 43, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß als Schalter (150, 151, 152, 153; 180, 181) elektronische Schalter verwendet werden, die zu beliebigen Zeitpunkten geschlossen und geöffnet werden können, und daß die Schalter, die zum Übergang vom dritten Schaltzustand in den ersten oder zweiten Schaltzustand geöffnet werden müssen, möglichst genau in den idealen Schaltzeitpunkten geöffnet werden, in denen der Strom, der im dritten Schaltzustand durch die weitere Wicklung (11; 35, 36) fließt, die nach dem Übergang in den ersten bzw. zweiten Schaltzustand an ihre entsprechende Steuerspannung angeschlossen ist, denselben Wert besitzt, wie der Strom der unmittelbar nach dem Schaltvorgang in dieser weiteren Wicklung (11; 35, 36) fließt.
45. Verfahren nach Anspruch 44, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß als Näherung für die idealen Schaltzeitpunkte die Zeitpunkte zum Öffnen der Schalter verwendet werden, in denen der Strom, der im ersten oder zweiten Schaltzustand durch die weitere Wicklung (11; 35, 36) fließt, die in diesem Schaltzustand an ihrer entsprechenden Steuerspannung liegt, einen nulldurchgang aufweist.
46. Verfahren nach Anspruch 45, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß der Zeitabstand, den ein nulldurchgang des Stroms, der im ersten oder zweiten Schaltzustand durch die in diesem Schaltzustand an ihrer jeweiligen Steuerspannung liegende weitere Wicklung (11; 35, 36)

fließt, vom vorausgehenden oder zum nachfolgenden Nulldurchgang dieser Steuerspannung gemessen und der Meßwert gespeichert wird, und daß bei späteren Übergängen vom dritten in den ersten oder in den zweiten Schaltzustand dieser gespeicherte Meßwert verwendet wird, um ausgehend von einem Nulldurchgang der Steuerspannung den Zeitpunkt zum Öffnen der betreffenden Schalter zu ermitteln.

FIG. 1

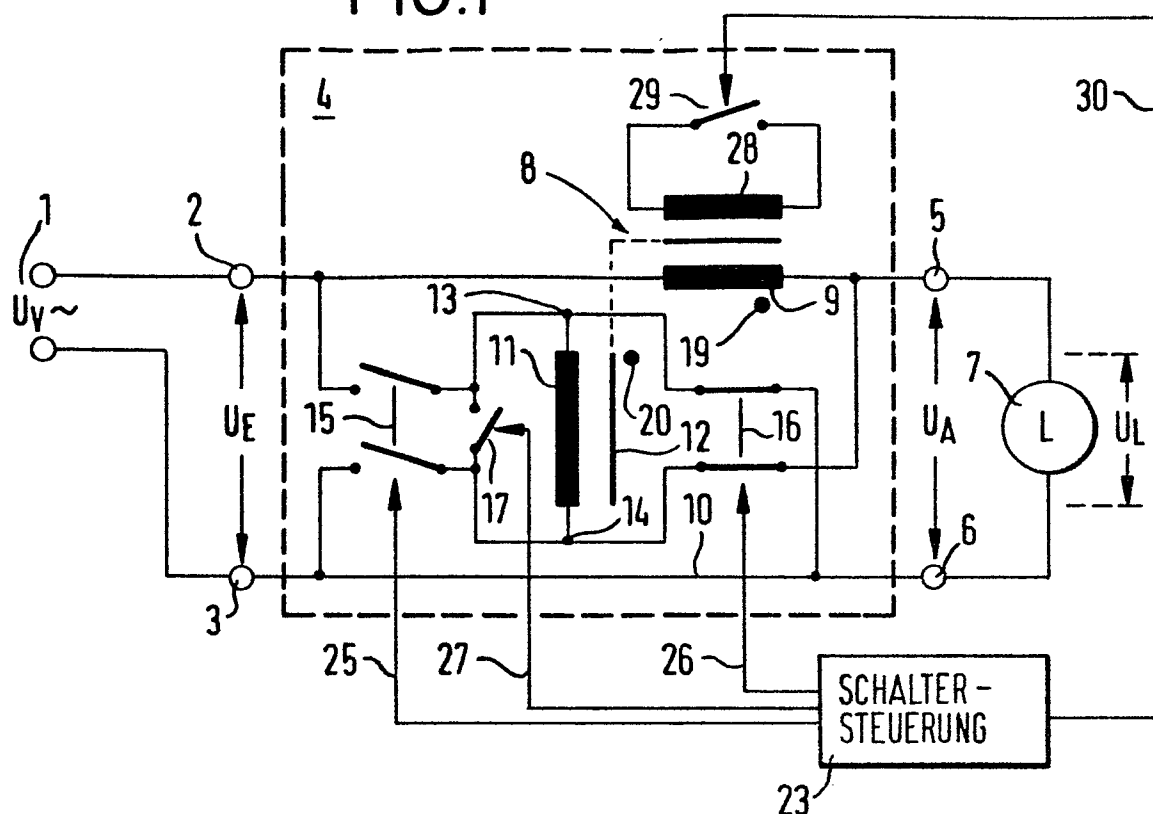


FIG. 2

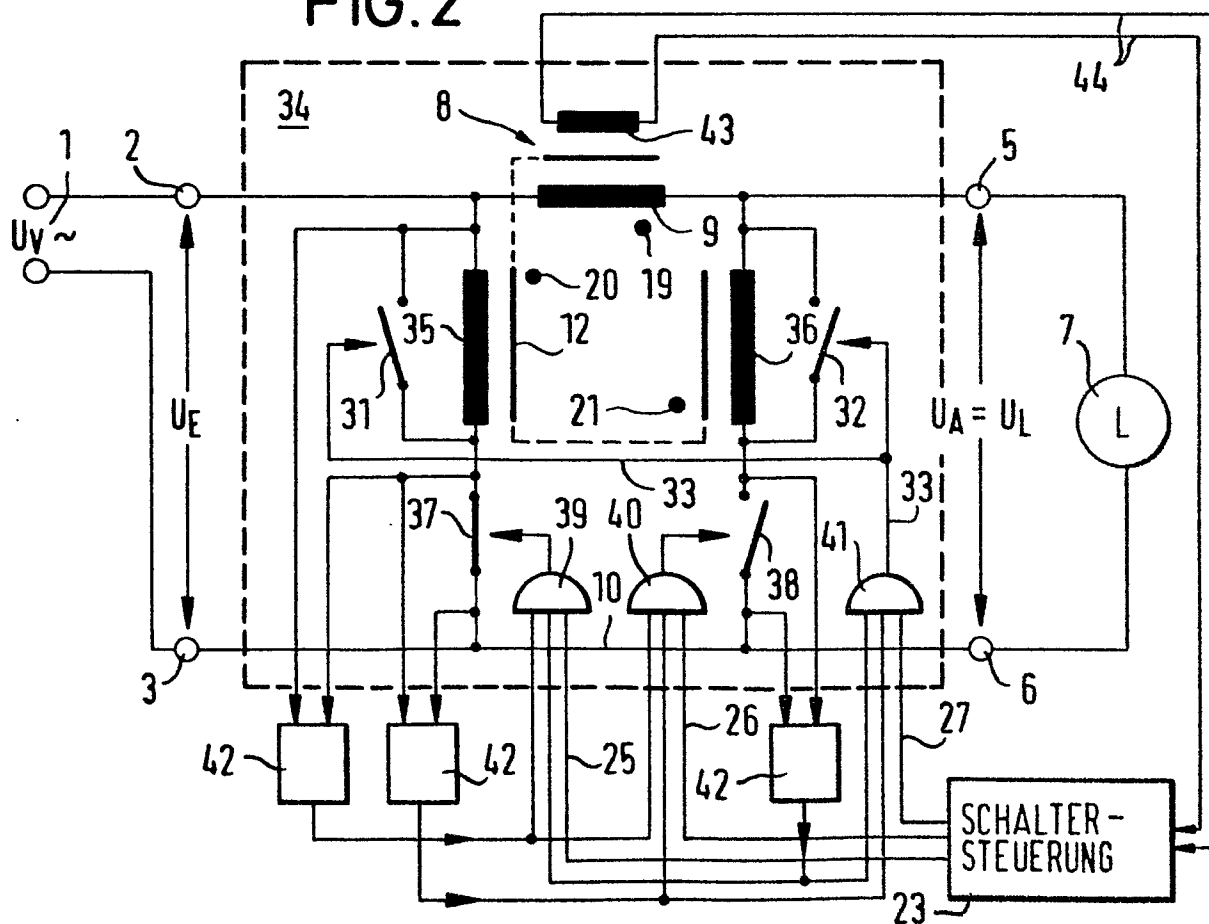


FIG. 3

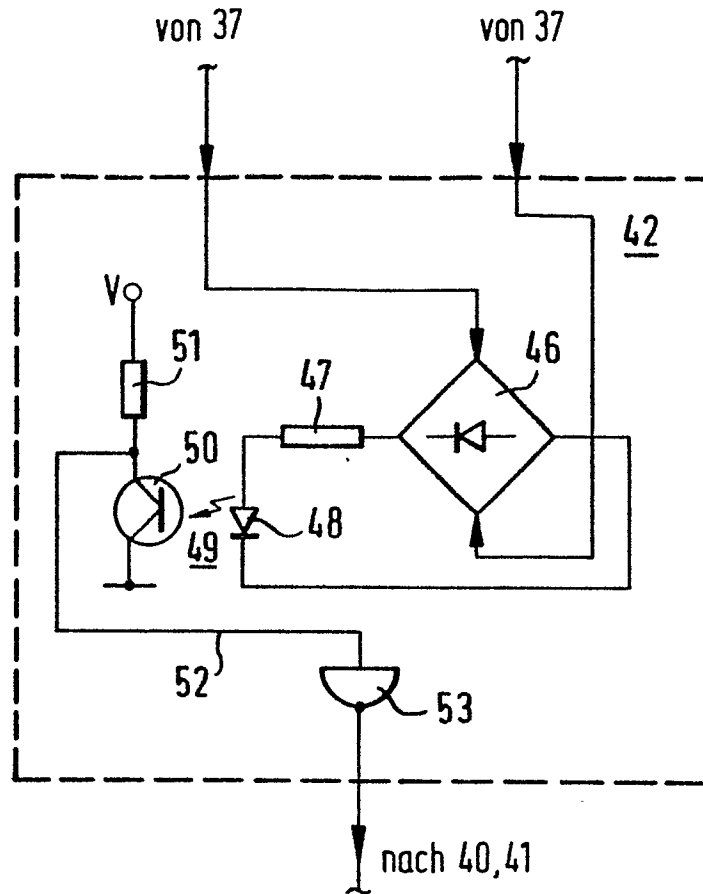
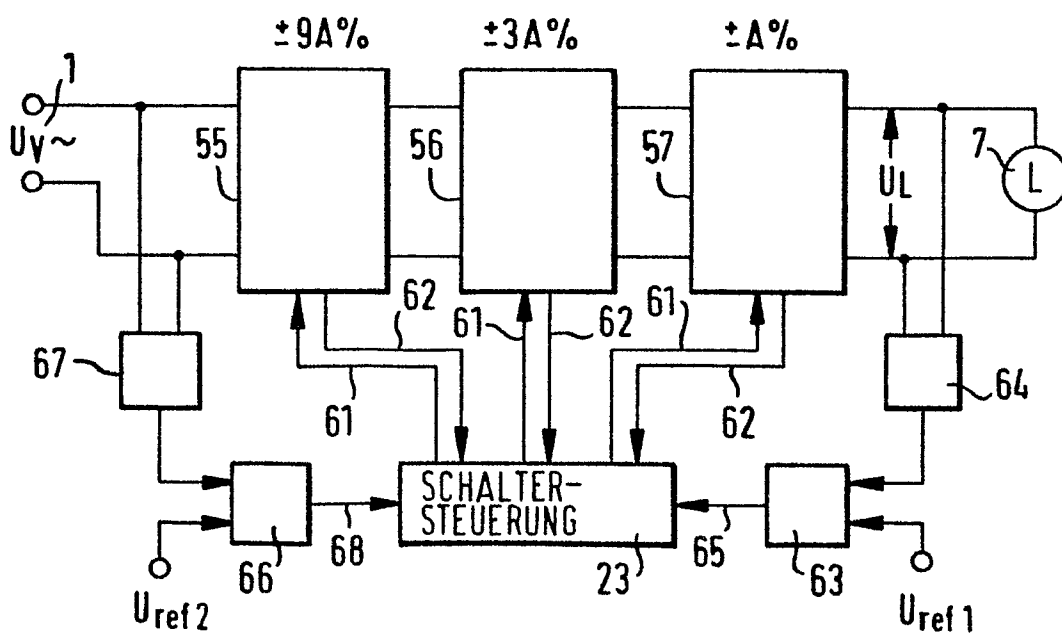


FIG. 5



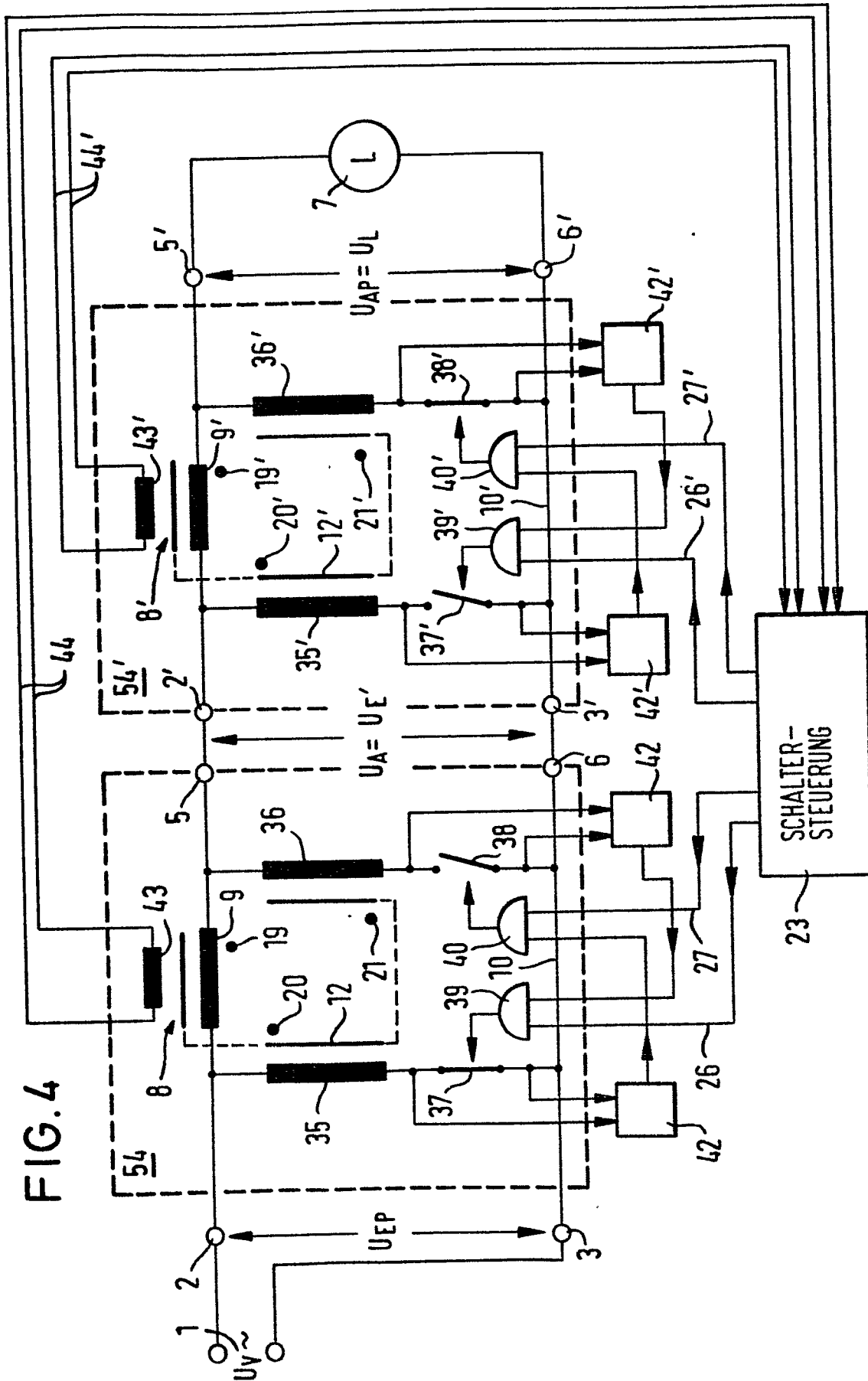


FIG. 6

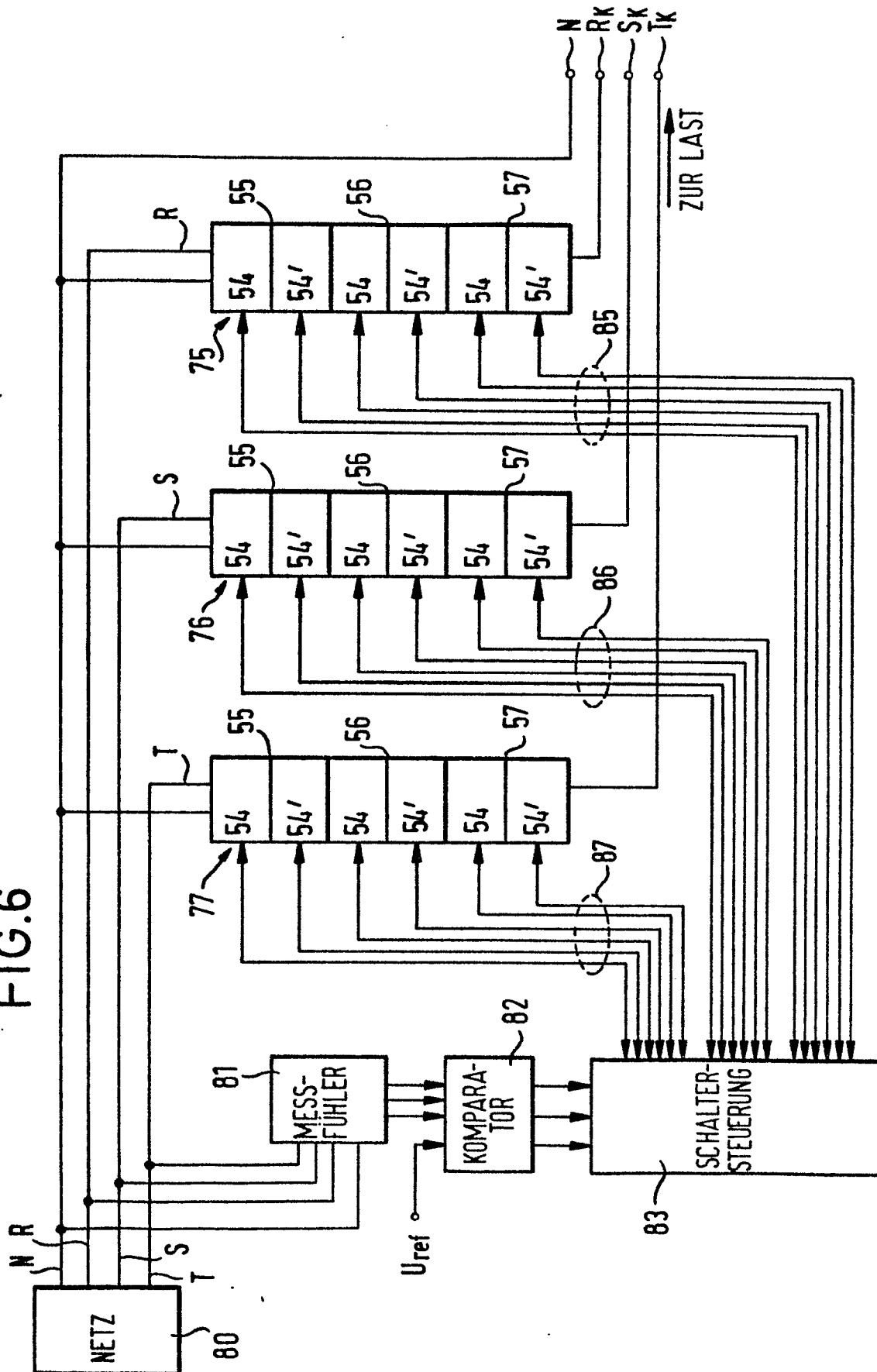


FIG.7

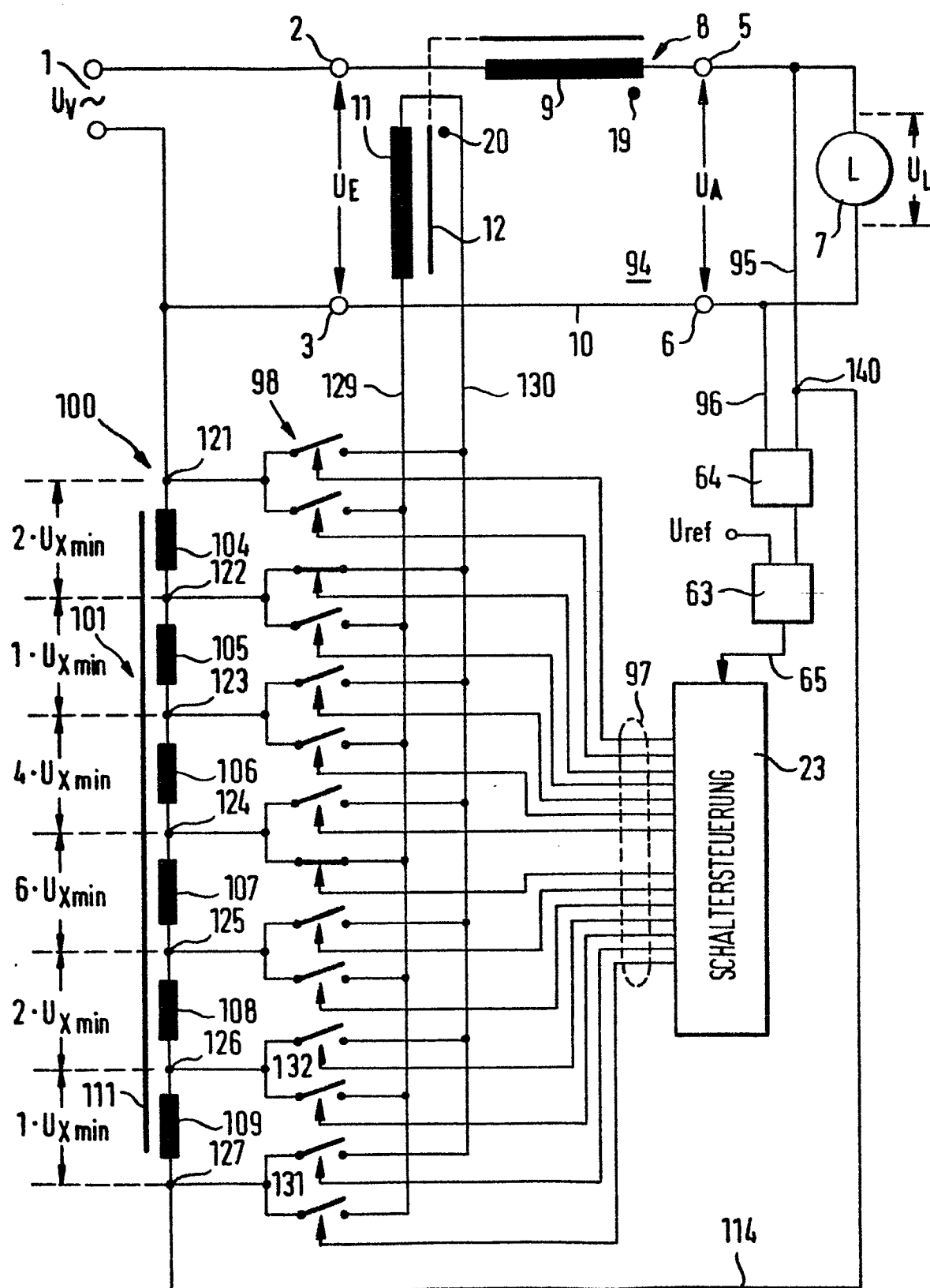


FIG. 8

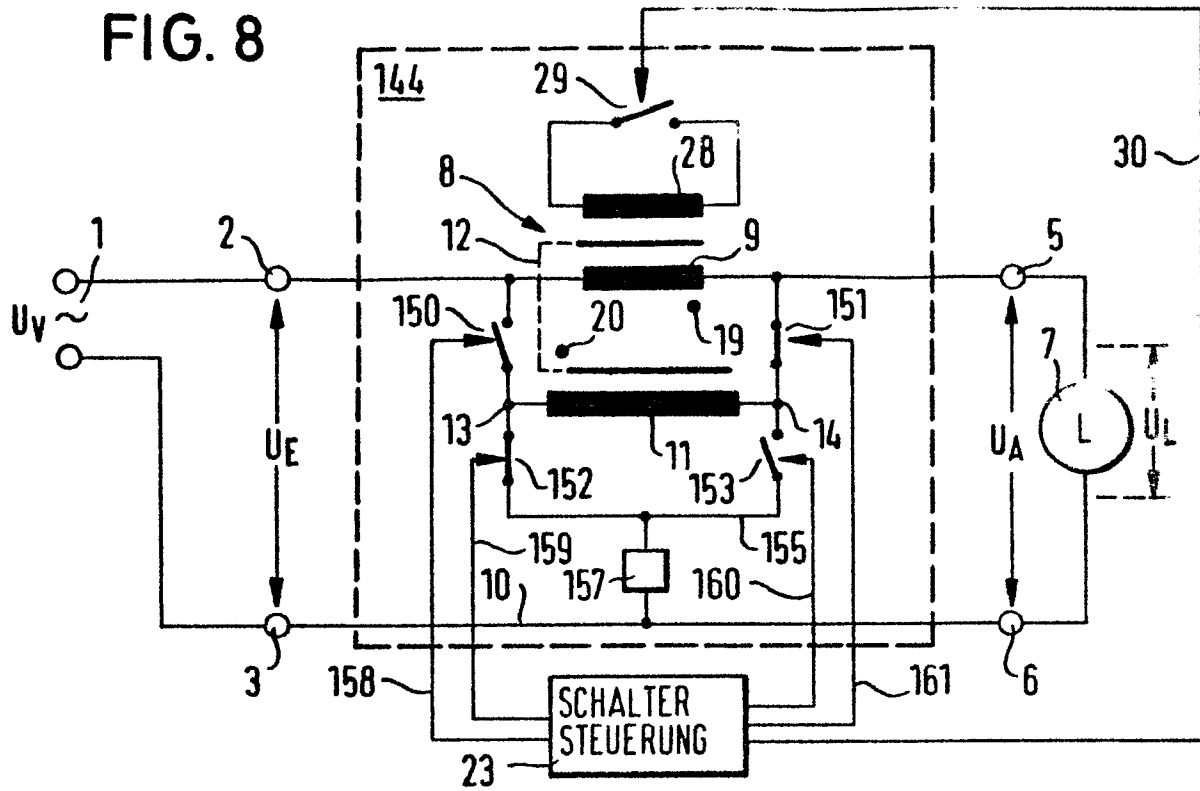


FIG. 9

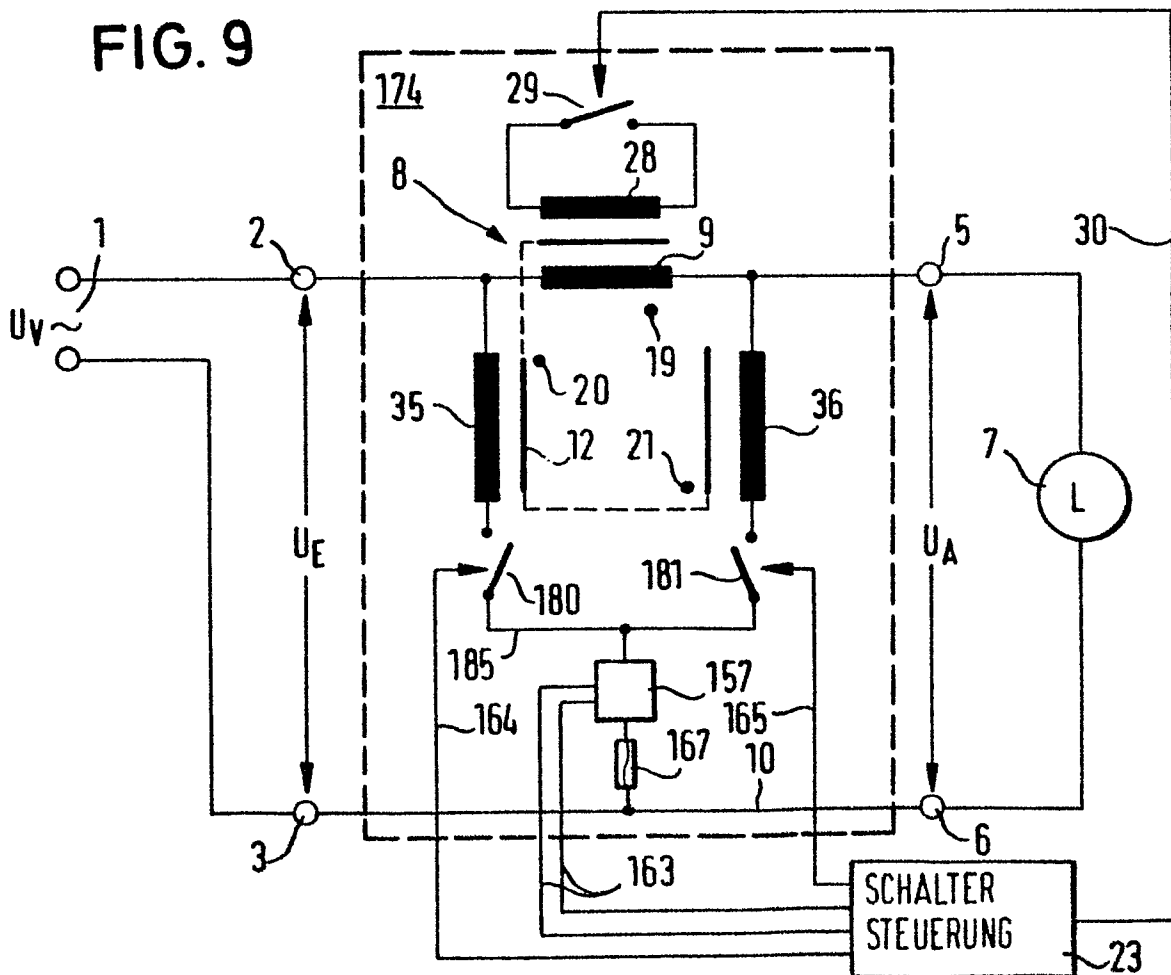


FIG. 10

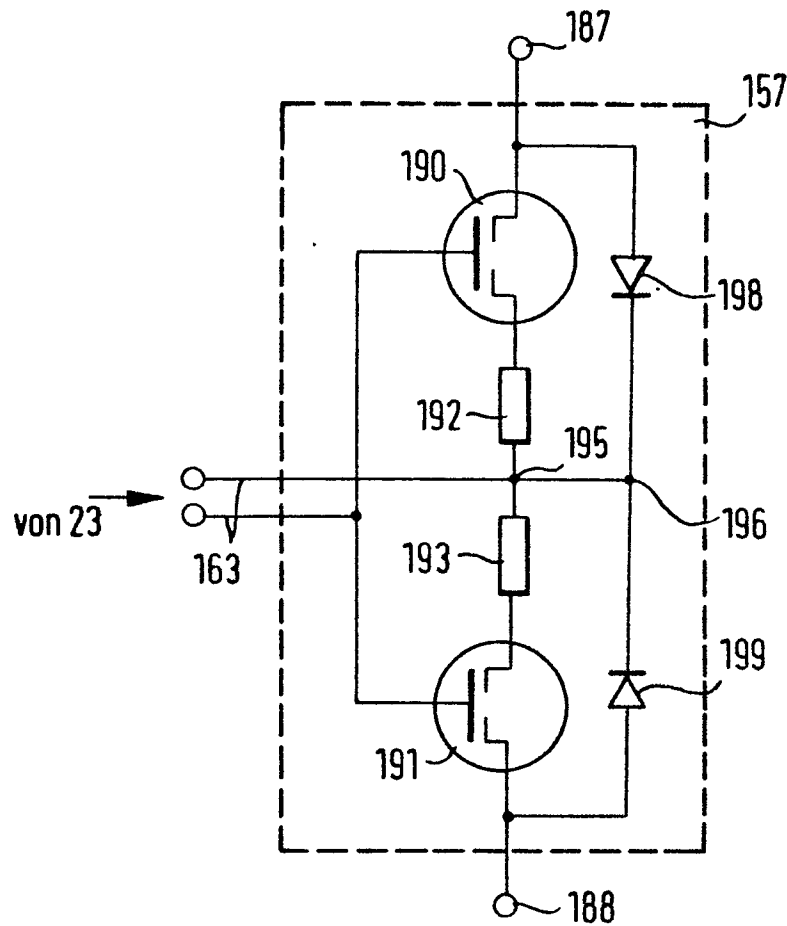


FIG. 11

