

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
24. Februar 2005 (24.02.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/017942 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01J 37/00**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/008604

(22) Internationales Anmeldedatum:
30. Juli 2004 (30.07.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
103 36 881.7 11. August 2003 (11.08.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **HÜTTINGER ELEKTRONIK GMBH + CO. KG**
[DE/DE]; Elsässer Strasse 8, 79110 Freiburg (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **ZIEGLER, Joachim**
[DE/DE]; Oberer Graben 34, 77963 Schwanau 1 (DE).

(74) Anwalt: **KOHLER SCHMID MÖBUS**; Rupp-
mannstrasse 27, 70565 Stuttgart (DE).

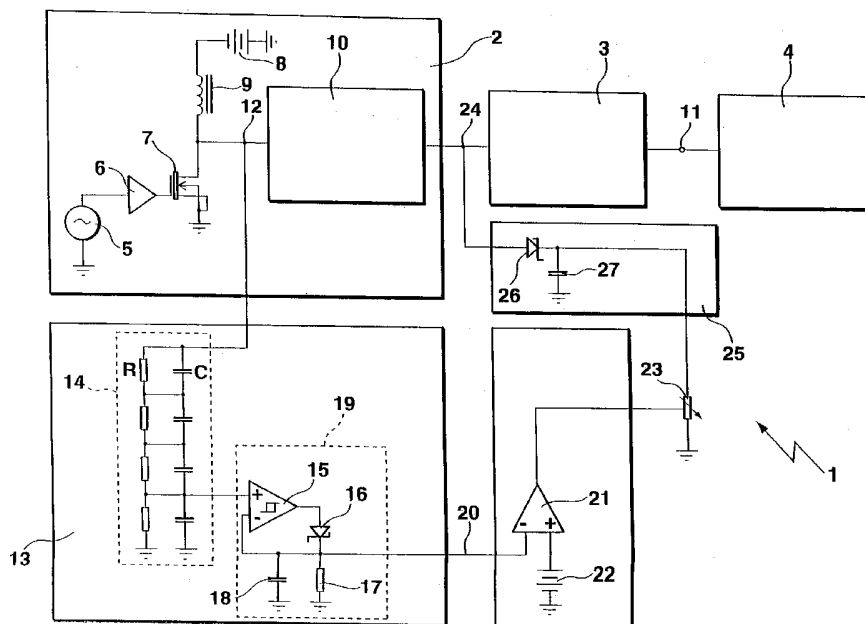
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,
GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS,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

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: HIGH-FREQUENCY EXCITATION SYSTEM COMPRISING A LIMITING CIRCUIT

(54) Bezeichnung: HOCHFREQUENZANREGUNGSANORDNUNG MIT EINER BEGRENZUNGSSCHALTUNG



(57) Abstract: Disclosed is a method for limiting the voltage applied to a component (7) in a high-frequency path (HF path) of a high-frequency excitation system as a result of disturbances. According to said method, a high-frequency signal (HF signal) is picked up at a first random point (12) of the HF path and energy is withdrawn from the HF path when the HF signal picked up at said first point (12) exceeds a reference value, resulting in the component (7) being safely protected against overvoltages.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

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

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Begrenzung der an einem Bauelement (7) in einem Hochfrequenz-Pfad (HF-Pfad) einer Hochfrequenzanregungsanordnung aufgrund von Störungen anliegenden Spannung erfolgt ein Abgreifen eines Hochfrequenz-Signals (HF-Signal) an einer ersten beliebigen Stelle (12) des HF-Pfads und eine Entziehen von Energie aus dem HF-Pfad, wenn das an der ersten Stelle (12) abgegriffene HF-Signal einen Referenzwert überschreitet. Dadurch wird das Bauelement (7) sicher vor Überspannungen geschützt.

Bezeichnung der Erfindung:

Hochfrequenzanregungsanordnung mit einer Begrenzungsschaltung

BESCHREIBUNG**Stand der Technik**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Begrenzung der an einem Bauelement in einem Hochfrequenz-Pfad (HF-Pfad) einer Hochfrequenzanregungsanordnung aufgrund von Störungen anliegenden Spannung, Strom oder Leistung und eine Hochfrequenzanregungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens.

Hochfrequenzanregungsanordnungen bestehen häufig aus einem Hochfrequenzgenerator (HF-Generator) mit internem Reaktanznetzwerk und einem Anpassungsnetzwerk. An dieses kann eine Last angeschlossen werden. Die Last kann beispielsweise eine

Gasentladung in einer Plasmakammer sein. Während des Ablaufs von Plasmaprozessen in der Plasmakammer zur Beschichtung und Bearbeitung von Materialien kommt es immer wieder zu Überschlägen, den so genannten Arcs, in der Plasmakammer. Diese Vorgänge können dazu führen, dass sich Energie, die in Blindelementen des Anpassungsnetzwerks, des Reaktanznetzwerks oder anderen Teilen der Hochfrequenzanordnungsanordnung gespeichert ist, sehr schnell entlädt. Die Blindanteile von Strom, Spannung und Leistung können in Abhängigkeit der Güte der Netzwerke ein Vielfaches der Realanteile betragen und somit die Belastungsgrenze des Gesamtsystems bei weitem überschreiten. Die Energieentladungen, insbesondere die damit verbundenen hohen Spannungen, sind in der Lage, Baugruppen und Bauelemente dauerhaft zu schädigen oder eine Vorschädigung der Baugruppen und Bauelemente zu bewirken, die dann sofort oder zu einem späteren Zeitpunkt zum Ausfall des HF-Generators oder des Anpassungsnetzwerks führen kann.

In transistorisierten HF-Verstärkern, die Bestandteil des HF-Generators sind, werden häufig MOSFETs eingesetzt. Diese zeigen eine besondere Empfindlichkeit gegenüber Überspannung. So kann eine Überspannung (Spannung oberhalb der zulässigen Spannung) von Drain nach Source zu einem so genannten Avalanche-Effekt führen, der einen MOSFET in sehr kurzer Zeit zerstören kann. Dabei werden Elektronen durch die hohe Spannung derart beschleunigt, dass sie weitere Elektronen aus dem Gitter des Halbleiters, aus dem die MOSFETs hergestellt sind, freisetzen. Diese werden ebenfalls beschleunigt und eine Kettenreaktion setzt ein, die zu örtlichen Durchschlägen, und zu einer Degeneration der Gitterstrukturen führen kann. Dadurch können so genannten "hot spots" entstehen. Innerhalb relativ kurzer Zeit, die von der Bauart des MOSFET und der angelegten Spannung sowie der Temperatur abhängt und von μs bis hin zu einigen Tagen dauern kann, wird der MOSFET zerstört.

Um dieses Problem zu umgehen, wurden bisher auf unterschiedliche Weise die an die Last abgegebene und reflektierte Leistung in einer HF-Anlage gemessen und durch Leistungsregelung versucht, die Spannung an den empfindlichen Bauteilen, also insbesondere an den MOSFETs, innerhalb der erlaubten Grenzen zu halten. Diese Regelung ist aber für kurzzeitige Impulse viel zu langsam.

Es gibt auch Versuche, Störungen von der Last, also insbesondere einer Plasmaquelle, durch geeignete Filteranordnungen von den empfindlichen Bauteilen fern zu halten. Aus der US 5,747,935 ist eine Schaltung bekannt, in der unerwünschte Störungen von Plasmaquellen mittels eines Filters unterdrückt werden, der Energie bei allen Frequenzen außer bei der Grundfrequenz absorbiert. Sehr schnelle Impulse, wie sie bei Arcs in der Plasmakammer auftreten, vor allem solche, die Anstiegsgeschwindigkeiten im Bereich der Anstiegsgeschwindigkeiten der Grundfrequenz besitzen, können damit aber nicht oder nur unzureichend absorbiert werden. Zudem kann eine solche Schaltungsvorrichtung nur für HF-Generatoren mit einer sehr geringen Frequenzvariation der Grundfrequenz realisiert werden. Weiterhin stellt eine solche Schaltungsvorrichtung einen zusätzlichen unerwünschten Energiespeicher dar.

Eine weitere Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen besteht darin, die entsprechenden Bauteile überzudimensionieren. Das heißt, man setzt beispielsweise MOSFETs mit einer Spannungsbelastbarkeit von 600V ein, obwohl im Normalbetrieb nur Spannungen bis zu 300V anliegen. Solche MOSFETs sind um ein Vielfaches teurer und besitzen andere negative Eigenschaften, wie beispielsweise einen hohen Durchlasswiderstand, die sich negativ auf den Wirkungsgrad des HF-Generators auswirken können.

Es ist weiter bekannt, zur Spannungsbegrenzung an empfindlichen Bauteilen so genannte Clipper-Schaltungen einzusetzen.

Dies sind z.B. Supresserdioden, Zenerdioden oder ähnliche Bauteile oder Schaltungsanordnungen bestehend aus mehreren Bauteilen. Diese Clipper-Schaltungen ändern ihren Sperrwiderstand bei einer definierten Spannung, der so genannten Durchbruchspannung. Wenn diese Bauteile ausreichend dimensioniert sind, können sie empfindliche Bauteile in der HF-Anregungsanordnung schützen. Allerdings lassen sich solche Clipper-Schaltungen nicht exakt auf die maximal am zu schützenden Bauteil zulässige Durchbruchspannung einstellen. Kommt die Spannung in die Nähe der Durchbruchspannung, so kommt es zu einzelnen kleinen Durchbrüchen, zum Rauschen und zur Erzeugung von Oberwellen. Zudem besitzen solche Clipper-Schaltungen eine Kapazität, die bei der vorgesehenen HF-Leistung erhebliche Verluste erzeugt. Die HF-Anregungsanordnung wird durch Rauschen, Oberwellen und die Kapazität verändert und meist negativ beeinflusst. Zudem besitzen solche Clipper-Schaltungen eine lange und nicht steuerbare Erholzeit, was zu Instabilitäten im HF-Generator führen kann.

Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung bereit zu stellen, um spannungs-, strom-, und leistungsempfindliche Bauteile in einer Hochfrequenzanregungsanordnung wirkungsvoll zu schützen.

Gegenstand der Erfindung

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass bei einem Verfahren der eingangs genannten Art ein Hochfrequenz-Signal (HF-Signal) an einer ersten beliebigen Stelle des HF-Pfads abgegriffen wird und Energie aus dem HF-Pfad entzogen wird, wenn das an der ersten Stelle abgegriffene HF-Signal oder eine proportionale Größe einen Referenzwert überschreitet.

Dies bedeutet, dass dem HF-Pfad Energie entnommen wird und damit das zerstörend wirkende Energiepotenzial im HF-Pfad begrenzt oder abgesenkt wird. Unter einem HF-Pfad im Sinne der Erfindung wird die Strecke zwischen einem HF-Erzeuger im HF-Generator einer Hochfrequenzanregungsanordnung und einem Lastanschluss der Hochfrequenzanregungsanordnung verstanden. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt es, auf kurzzeitige Spannungs-, Strom- oder Leistungsanstiege wesentlich schneller zu reagieren als dies im Stand der Technik möglich ist. Durch den Referenzwert kann sehr genau eingestellt werden, wann und wie viel Energie der HF-Anlage entnommen wird. Das Verfahren bewirkt, dass die Anstiegsgeschwindigkeit von schnellen Überspannungen, Strömen oder Leistungen, wie sie beispielsweise beim Arcen in HF Plasma Systemen häufig auftreten, verlangsamt wird. Dadurch verlangsamt sich der Spannungs-, Strom oder Leistungsanstieg an dem zu schützenden Bauelement bzw. der zu schützenden Baugruppe im HF-Pfad. Wenn der Referenzwert klein genug gewählt wird, können längere Totzeiten akzeptiert werden oder Bauelemente mit kürzeren Avalanchzeitverhalten eingesetzt werden. Totzeit ist dabei die Zeit, die zwischen dem Erkennen einer Überspannung und dem Beginn des Energieentzugs vergeht. Das Verfahren kann so realisiert werden, dass im Normalbetrieb der Hochfrequenzanregungsanordnung nahezu keine Verluste verursacht werden, und die Eigenschaften des HF-Pfades nicht verändert werden.

Bei einer Verfahrensvariante kann das Entziehen von Energie durch Abgreifen eines HF-Signals an einer zweiten Stelle des HF-Pfades erfolgen, wobei das abgegriffene HF-Signal in ein Gleichspannungssignal gewandelt wird und dieses begrenzt oder verringert wird. Dies bewirkt, dass im Normalbetrieb der HF-Pfad nicht belastet wird. Das Erzeugen eines Gleichspannungssignals entspricht einer Gleichrichtung des HF-Signals. Durch die Gleichrichtung können Störgrößen mit hohen Frequenzanteilen ($>100\text{kHz}$) stärker bedämpft werden, was einen zusätzlichen

Schutz der Bauelemente im HF-Pfad darstellt. Eine Spannungsbegrenzungsschaltung, mit der das Verfahren durchgeführt wird, kann langsamer reagieren. Dabei können die erste und zweite Stelle des HF-Pfads, an denen ein HF-Signal abgegriffen wird, identisch sein. Grundsätzlich können durch das Verfahren Bauelemente oder Baugruppen an beliebiger Stelle im HF-Pfad geschützt werden und können die erste und zweite (Abgriffs-)Stelle beliebig gewählt werden.

Bei einer bevorzugten Verfahrensvariante wird aus dem an der ersten Stelle abgegriffenen HF-Signal ein gleichgerichteter Spitzenwert und/oder eine dazu proportionale Größe generiert. Durch die Spitzenwertgleichrichtung kann eine Größe erzeugt werden, die zu dem gemessenen Spitzenwert des HF-Signals proportional ist. Durch die Spitzenwertgleichrichtung ist es möglich, einen Vergleich mit einem Referenzwert durchzuführen.

Bei einer Weiterbildung der Verfahrensvariante wird der Spitzenwert und/oder die proportionale Größe mit dem Referenzwert verglichen. Die aus der Spitzenwertgleichrichtung erhaltene Größe kann einfach mit einem Gleichspannungsreferenzsignal verglichen werden. Durch diese Maßnahme kann das Verfahren exakt abgestimmt werden. Der Referenzwert, insbesondere eine Referenzspannung kann für sehr schnelle Änderungen der HF-Signale im HF-Pfad geringer gewählt werden, als für das zu schützende Bauelement unbedingt notwendig, um die Totzeit auszugleichen bzw. mit längeren Totzeiten arbeiten zu können.

Vorzugsweise wird das HF-Signal an der ersten Stelle in unmittelbarer Nähe eines vor einer Spannung zu schützenden Bauelements abgegriffen, da dies eine exakte Messung des HF-Signals ermöglicht. Dadurch wird ein optimaler Schutz des Bauelements erreicht ohne die HF-Anregungsanordnung an diese Stelle zu belasten oder deren Eigenschaften zu verändern.

Besonders bevorzugt ist es, wenn Änderungen des HF-Signals an der ersten Stelle mit einer Reaktionsgeschwindigkeit $\leq 100\mu\text{s}$, vorzugsweise $\leq 10\mu\text{s}$, besonders bevorzugt $\leq 1\mu\text{s}$ erfasst werden. Durch diese Maßnahme kann die Totzeit gering gehalten werden, d.h. die Zeit die zwischen dem Erkennen einer Überspannung und einer Reaktion darauf, insbesondere dem Energieentzug, vergeht. Die Totzeit muss geringer sein, als die Zeit in der das zu schützende Bauelement zerstört wird.

Die Aufgabe wird außerdem gelöst durch eine Hochfrequenzanregungsanordnung mit einem einen HF-Generator umfassenden HF-Pfad, der von einem HF-Generator zu einem Lastanschluss der Hochfrequenzanregungsanordnung verläuft, wobei zum Schutz von Bauelementen des HF-Pfads eine Spannungs-, Strom- oder Leistungsbegrenzungsschaltung vorgesehen ist, die eine mit einer ersten Stelle des HF-Pfads verbundene, aus einem Vergleich eines HF-Signals mit einem Referenzwert ein Ausgangssignal erzeugende Ansteuerschaltung und einen ebenfalls mit dem HF-Pfad verbundenen Energiewandler umfasst, wobei die Ansteuerschaltung mit dem Ausgangssignal den Energiewandler ansteuert, der der Hochfrequenzanregungsanordnung Energie entzieht, wenn der Referenzwert überschritten wird. Das Entziehen von Energie bewirkt, dass Spannung und/oder Strom im HF-Pfad verlangsamt ansteigen und einen geringeren Maximalwert erreicht. Dadurch werden Bauelemente im HF-Pfad geschützt. Der HF-Pfad kann dabei Reaktanz-, Impedanz-, und Anpassungsnetzwerke umfassen. Insbesondere enthält der HF-Pfad alle Bauteile zwischen einem HF-Erzeuger des HF-Generators und dem Lastanschluss der Hochfrequenzanregungsanordnung. Es sind die unterschiedlichsten Ansteuerschaltungen denkbar. In einer besonders einfachen Ausführungsform kann die Ansteuerschaltung eine Zener-Diode sein, die mit dem HF-Pfad und dem Energiewandler verbunden ist. Die Zener-Diode ist bis zu einer bestimmten Spannung, der Referenzspannung, hochohmig. Bei Überschreiten der Referenzspannung wird sie niederohmig. Damit ändert sich das Verhalten des

Energiewandlers. Dies bewirkt, dass dem HF-Pfad durch den Energiewandler, insbesondere in Form von Wärme, Energie entzogen wird, so dass die Spannung im HF-Pfad reduziert wird und Bauelemente geschützt werden.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der Energiewandler eine aus dem HF-Signal eine Gleichspannung erzeugende Gleichrichterschaltung. Eine solche Gleichrichterschaltung belastet im Normalbetrieb den HF-Pfad nicht, wirkt aber bei kurzfristigen Spitzenspannungserhöhungen im HF-Pfad als Last und verlangsamt den Spannungsanstieg.

Vorteilhafterweise umfasst die Gleichrichterschaltung eine Diode und einen mit Masse verbundenen Kondensator. Somit wird die Gleichrichterschaltung auf einfache Art und Weise mit wenigen Bauelementen realisiert.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform umfasst der Energiewandler ein Einstellglied. Mit einem Einstellglied kann die Spannungsbegrenzungsschaltung optimal auf die Erfordernisse, die sich aus dem HF-Pfad und dem zu schützenden Element ergeben, eingestellt werden. Beispielsweise kann der Energieentzug so eingestellt werden, dass nicht nur das zu schützende Bauelement vor zu hoher Spannung geschützt wird, sondern auch weiter zusätzlich Energie entzogen wird, um Ladung aus dem zu schützenden Element zu entfernen. Dies kann beispielsweise erfolgen, indem Energie länger entzogen wird als der erfasste Spitzenwert über dem Referenzwert liegt. Es kann vorgesehen sein, dass die Länge des Zeitraums, während dem Energie entzogen wird, vorgebar ist. Alternativ kann die Spannung am Bauelement stärker abgesenkt werden und demzufolge mehr Energie entzogen werden als notwendig wäre, um die Spannung am Bauelement unter dem Grenzwert für die Zerstörung des Bauelements zu halten.

Bei einer besonders einfachen Ausführungsform kann das Einstellglied als einstellbarer Widerstand ausgebildet sein. Mit einem einstellbaren Widerstand kann in Abhängigkeit von dem abgegriffenen HF-Signal eingestellt werden, wie viel Energie abgeführt wird. Der einstellbare Widerstand kann als Transistor, insbesondere als MOSFET, ausgebildet sein oder aus einer Kombination von Widerständen und Transistoren bestehen. Im Widerstand wird elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Dies stellt die einfachste Möglichkeit dar, Energie aus der HF-Anregungsanordnung abzuziehen. Alternativ könnte die elektrische Energie in einen Stromversorgungskreis zurück geführt werden.

Bei einer Ausführungsform der Erfindung kann die Ansteuerung ein Spitzenwerterfassungsglied umfassen, dessen Ausgang mit einem den Energiewandler ansteuernden Vergleicher verbunden ist. Durch das Spitzenwerterfassungsglied können Spannungsspitzen der HF-Signale erfasst werden und für einen Vergleich mit einem Referenzwert aufbereitet werden. Mit einem Vergleicher kann eine Spannungsabsenkung im HF-Pfad bewirkt werden, die größer ist, als notwendig, um das Bauteil zu schützen. Insbesondere kann zu diesem Zweck der Ausgang des Vergleichers auf seinen mit dem Spitzenwerterfassungsglied verbundenen Eingang rück gekoppelt werden. Eine solche Rückkopplung kann aus einer Kombination von Widerständen und Kondensatoren bestehen. Damit lässt sich auf einfache Art und Weise ein PID-Regler aufbauen.

Bei einer bevorzugten Weiterbildung weist das Spitzenwerterfassungsglied einen Spannungsteiler und einen nachgeschalteten Spitzenwertgleichrichter auf. Der Spannungsteiler ist hochohmig und belastet daher den HF-Pfad praktisch nicht. Der Spannungsteiler kann frequenzkompensiert sein, um Spannungen mit hohen Frequenzen erfassen zu können. Außerdem können Spannungen über einen großen Frequenzbereich erfasst werden. Bei Ü-

berkompensation des Spannungsteilers kann auf schnelle Änderungen der Störungen besonders stark reagiert werden. Der Spitzenwertgleichrichter erzeugt ein zum erfassten Spitzenwert proportionales Ausgangssignal, das schnell auf Änderungen des HF-Signals reagiert. Er hält quasi die gemessene Spannung an ihrem höchsten Wert fest. Das daraus resultierende Signal kann einfach mit einem Referenzwert verglichen werden.

Wenn mehrere Ansteuerschaltungen vorgesehen sind, können mehrere Bauelemente im HF-Pfad gezielt geschützt werden. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass mehrere Spitzenwerterfassungsglieder vorgesehen sind, wobei jedes Spitzenwerterfassungsglied bei je einem zu schützenden Bauelement mit dem HF-Pfad verbunden ist und alle Spitzenwerterfassungsglieder mit dem Energiewandler verbunden sind, der insbesondere aus einem Gleichrichter und einem einstellbaren Widerstand besteht.

Bei einer bevorzugten Weiterbildung sind den Ansteuerschaltungen Prioritäten zugeordnet. Dabei kann vorgesehen sein, dass die Ansteuerschaltung, die das empfindlichste Bauelement überwacht, Vorrang vor den übrigen hat. Alternativ kann vorgesehen sein, dass diejenige Ansteuerschaltung, die zuerst ein Überschreiten eines Referenzwerts detektiert, den Vergleich und damit den Energiewandler am stärksten beeinflusst. Die Spitzenwerterfassungsglieder können zu diesem Zweck über Dioden in geeigneter Weise zusammen geschaltet sein.

Wenn die Gleichrichterschaltung eine Spannungsverdopplerschaltung umfasst, kann der Energiefluss in die Spannungsbegrenzungsschaltung reduziert werden. Damit werden die Bauelemente des Gleichrichters und das Einstellglied vor Überlastung geschützt.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform sind die Ausgänge des Spitzenwerterfassungsglieds und/oder des Verglei-

chers mit einer Steuereinheit verbunden. Somit können die am Ausgang des Spitzenwerterfassungsglieds und am Ausgang des Vergleichers anliegenden Signale von einer externen Steuereinheit verarbeitet werden, um den HF-Generator auszuregeln, wenn die Störung länger andauert, als die Spannungsbegrenzungsschaltung verträgt. Alternativ kann die Spannungsbegrenzungsschaltung umso kleiner ausgelegt werden, je schneller die Steuereinheit auf Störungen bzw. die Signale an den Ausgängen des Spitzenwerterfassungsglieds und des Vergleichers reagiert. Da die Ausgangssignale sehr schnell generiert werden, liegt es nur noch an der Geschwindigkeit der Steuereinheit, wie lange benötigt wird, um die Leistung der HF-Anregungsanordnung zu reduzieren.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels der Erfindung, anhand der Figuren der Zeichnung, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

Zeichnung

Ein Ausführungsbeispiel ist in der schematischen Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Hochfrequenzanregungsanordnung;

Fig. 2 eine Spannungsverdopplerschaltung.

Die in der **Fig. 1** gezeigte HF-Anlage **1** umfasst einen HF-Generator **2**, ein Anpassungsnetzwerk **3** und eine als Plasmakammer ausgebildete Last **4**. Der HF-Generator **2** weist einen HF-Erzeuger **5** niedriger Leistung, einen Treiber **6** und einen Leistungstransistor **7**, der hier als MOSFET ausgebildet ist, auf. Er weist ferner eine Gleichspannungsquelle **8** und eine Drosselspule **9** auf. Die Anordnung bestehend aus HF-Erzeuger **5**, Treiber **6**, Leistungstransistor **7**, Gleichspannungsquelle **8**, Drosselspule **9** und internem Reaktanznetzwerk **10** stellt einen HF-Verstärker, insbesondere einen Klasse E Verstärker, dar. Der HF-Generator **2** besitzt in der Regel einen festen Ausgangswiderstand, der üblicherweise bei 50 Ohm liegt. Die als Plasmakammer ausgebildete Last **4** hat je nach Gasdruck und Zustand des Plasmas stark wechselnde Eingangswiderstände. Das Anpassungsnetzwerk **3** passt den Lastwiderstand des Plasmas dynamisch an den Ausgangswiderstand des HF-Generators **2** an. Dies geschieht in der Regel durch Verändern von Induktivitäten und Kapazitäten im Anpassungsnetzwerk **3**. Da dies zumeist mechanisch erfolgt, beispielsweise durch Verdrehen von Kondensatorplatten, ist die Reaktionszeit auf Laständerungen im Bereich von ms bis hin zu Sekunden relativ langsam. Schnellere Laständerungen führen dementsprechend zu Reflektionen, die ebenso wie Arcs in der Plasmakammer zu Überspannungen in einem HF-Pfad zwischen dem HF-Erzeuger **5** und einem Lastanschluss **11** führen können. An einer ersten Stelle **12** des HF-Pfads ist ein Spitzenwerterfassungsglied **13** angeschlossen. Das Spitzenwerterfassungsglied **13** greift ein HF-Signal, insbesondere einen Spannungs- oder Stromimpuls an der Stelle **12** ab und führt es einem Spannungsteiler **14** zu, der an die erste Stelle **12** angeschlossen ist, in diesem Fall an den Drain-Anschluss des Leistungstransistors **7**. Der Spannungsteiler **14** ist hochohmig, um den HF-Pfad an der ersten Stelle **12** nicht zu beeinflussen und besteht aus mehreren in Reihe geschalteten Widerständen **R** mit jeweils parallel geschalteten Kondensatoren **C**. Mit einer solchen Anordnung lassen sich Wechselspannungen unterschiedlicher

Frequenzen mit einer großen Bandbreite erfassen. Die Kondensatoren C dienen der Kompensation der Eingangskapazität des nachgeschalteten Komparators **15**. Durch geeignete Wahl der Werte der Kondensatoren C lässt sich die Empfindlichkeit über der Bandbreite verstellen. Der Komparator **15**, die Diode **16** und die Kombination von Widerstand **17** und Kondensator **18** bilden einen Spitzenwertgleichrichter **19**, dessen Ausgangssignal sehr schnell, insbesondere mit Reaktionsgeschwindigkeiten $< 1\mu\text{s}$ auf Änderungen des HF-Signals an der ersten Stelle **12** reagiert. Dem Ausgangssignal des Spitzenwertgleichrichters entspricht die Hüllkurve des HF-Signals. Eine schnelle Reaktionszeit an dieser Stelle ist wichtig, da die empfindlichen Bauteile, hier der Leistungstransistor **7**, bei Überspannung extrem schnell Schaden erleiden können. Der Ausgang **20** des Spitzenwerterfassungsglieds **13** ist auf einen Eingang eines Vergleichers **21** geschaltet. Auf den zweiten Eingang des Vergleichers **21** ist eine von einer einstellbaren Spannungsquelle **22** gelieferte einstellbare Referenzspannung geschaltet. Der Ausgang des Vergleichers **21** steuert ein Einstellglied **23** an. Das Einstellglied **23** kann ein einstellbarer Widerstand, insbesondere ein Transistor sein. Vorteilhaft ist auch eine Kombination aus Widerständen und Transistoren, da dann die Leistung auf mehrere Bauteile verteilt werden kann.

Das Einstellglied **23** ist im Ausführungsbeispiel bei einer ersten Steuerspannung des Vergleichers **21** hochohmig und bei einer zweiten Steuerspannung niederohmig. Im Normalfall ist das Ausgangssignal des Spitzenwerterfassungsglieds **13** kleiner als die Referenzspannung. Dann liegt am Ausgang des Vergleichers **21** die erste Steuerspannung an. Überschreitet das Ausgangssignal des Spitzenwerterfassungsglieds **13** die Referenzspannung, so wechselt der Ausgang des Vergleichers **21** seine Spannung von der ersten Steuerspannung zu der zweiten Steuerspannung. Dies führt dazu, dass das Einstellglied **23** von einem hochohmigen in einen niederohmigen Zustand wechselt. Zwischen dem Ausgang des

Vergleichers 21 und dem mit dem Ausgang 20 des Spitzenwerterfassungsglieds 13 verbundenen Signaleingang des Vergleichers 21 können Widerstände und Kondensatoren auf eine solche Weise geschaltet werden, dass ein so genannter PID Regler ausgebildet wird.

Vom Erkennen der Überspannung an der Stelle 12 bis zur Reaktion am Einstellglied 23 vergeht eine so genannte Totzeit. Diese Totzeit muss kleiner sein als die Zeit, in der der Leistungstransistor 7 durch Überspannung zerstört wird. Um dies sicher zu stellen, kann die Referenzspannung am Vergleichs 21 kleiner gewählt werden als das der maximal zulässigen Spannung am Leistungstransistor entsprechende Spitzenwertmesssignal (Ausgangssignal des Spitzenwerterfassungsglieds 13).

An der zweiten Stelle 24 ist eine Gleichrichterschaltung 25, umfassend eine Diode 26 und einen Kondensator 27, mit dem HF-Pfad verbunden. Liegt an dem Einstellglied 23 die erste Steuerspannung an, ist dieses hochohmig, so dass sich der Kondensator 27 nicht entladen kann. Die Diode 26 ist an der zweiten Stelle 24 mit dem HF-Pfad verbunden. Der Kondensator 27 lädt sich auf die gleichgerichtete Spitzenspannung der zweiten Stelle 24 auf. Dabei ist der Kondensator 27 so gewählt (erste Bedingung), dass der HF-Pfad möglichst nicht belastet wird, wenn die Leistung vom HF-Generator 2 hoch geregelt wird, also die Spitzenspannung an der zweiten Stelle 24 langsam steigt. Die Regelung der Leistung erfolgt mit Zeitkonstanten > 1 ms. Fällt die Spitzenspannung an der zweiten Stelle 24, so bleibt die Spannung an dem Kondensator 27 erhalten. Wird durch das Spitzenwerterfassungsglied 13 und den Vergleichs 21 eine Spitzenspannungserhöhung an der ersten Stelle 12 erkannt, wird das Einstellglied 23 niederohmig. Dadurch wird der Kondensator 27 entladen. Der Kondensator 27 ist dabei so dimensioniert (zweite Bedingung), dass für kurzzeitige Spitzenspannungserhöhungen im Bereich von wenigen μ s oder darunter an der zweiten

Stelle 24 die Gleichrichterschaltung 25 als Last wirkt und den Spannungsanstieg an der zweiten und damit auch an der ersten Stelle 24, 12 verlangsamt. Die Gleichrichterschaltung und das Einstellglied 23 stellen dabei einen Energiewandler dar, der der Hochfrequenzanregungsanordnung Energie entzieht.

Zur Bestimmung der Kapazitätswertes C_{load} des Kondensators 27 wird der Blindwiderstand der Kapazität bestimmt:

$Z = 1/(j\omega C) = 1/(j2\pi f C)$. Das bedeutet, dass zur Erfüllung der ersten Bedingung die Kapazität nicht zu groß gewählt werden darf. Die Regelung der Leistung erfolgt mit Anstiegsgeschwindigkeiten die einer Frequenz von 200Hz und darunter entsprechen. Wenn man die obere Grenze für die Kapazität C_{load} zu $C_{load_{max}} = 1\mu F$ legt, so beträgt Z_{min} bei $f_{max} = 200Hz$ ungefähr $1k\Omega$. Liegt die zweite Stelle 24 im HF-Pfad an einer Stelle, in der die Impedanz bei 10Ω liegt, so wäre Z_{min} um den Faktor 100 größer und würde die HF-Leistungsregelung nur unwesentlich belasten. Fällt die Spitzenspannung an der zweiten Stelle 24, so bleibt die Spannung an dem Kondensator 27 erhalten. Es findet dann kein Ladungstransport statt. Der HF-Pfad wird nicht belastet.

Zur Erfüllung der zweiten Bedingung muss ein Minimalwert für C_{load} festgelegt werden. Besonders empfindlich reagieren Bauteile im HF-Pfad bei Störungen mit Anstiegsgeschwindigkeiten, die einer Grenzfrequenz von über 100kHz entsprechen. Es wird beispielsweise davon ausgegangen, dass die zweite Stelle 24 im HF Pfad an einer Stelle liegt, in der die Impedanz 10Ω beträgt. Weiterhin wird beispielsweise vorausgesetzt, dass bei $f_{min} = 100kHz$ die Impedanz des Kondensators 27 maximal $Z_{max} = 50\Omega$ betragen soll. Damit ergibt sich ein minimaler Wert von C_{load} von ca $30nF$. Bei diesem Zahlenbeispiel ergibt sich also ein Wert für C_{load} im Bereich $30nF - 1\mu F$.

Dies bedeutet, dass die Spannungsbegrenzungsschaltung umfassend das Spitzenwerterfassungsglied 13, den Vergleicher 21, das Einstellglied 23 und die Gleichrichterschaltung 25 durch ihren vorgelagerten Abgriffpunkt an der zweiten Stelle 24 mit der nachgeschalteten Gleichrichterschaltung 25 dafür sorgt, dass die Anstiegsgeschwindigkeit von schnellen Spannungsimpulsen (kleiner wenige μs), wie sie bei HF Plasma Systemen häufig beim Arcen auftauchen, an der ersten Stelle 12 verlangsamt, indem es Energie abzieht. Damit verlangsamt sich dann auch der Spannungsanstieg am Leistungstransistor 7 und es wird eine geringere Amplitude der HF-Spannung erreicht.

Der Ort des Abgriffpunkts der zweiten Stelle 24 kann innerhalb des HF-Pfads günstig gewählt werden. Innerhalb des internen Reaktanznetzwerks 10 wird der Innenwiderstand ähnlich wie in dem Anpassungsnetzwerk 3 transformiert. Damit ergeben sich innerhalb des internen Reaktanznetzwerks 10 unterschiedliche Werte für den Innenwiderstand und damit für die Spitzenspannung über den HF-Pfad. Die zweite Stelle 24 kann wie im Beispiel oben an einer Stelle gewählt werden, an der der Innenwiderstand des HF-Pfades 10Ω beträgt, aber auch an einer beliebigen anderen Stelle. Dabei können die maximal zulässige Spitzenspannung an der Diode 26 und der maximal zulässige Spitzenstrom durch die Diode 26 sowie die maximal zulässige Spannung an dem Kondensator 27 und dem Einstellglied 23 berücksichtigt werden.

Die HF-Anlage 1 arbeitet bei einer Frequenz von 13,56 MHz. Es sind jedoch auch höhere Frequenzen, wie z.B. 27 MHz, denkbar. Die Leistung kann im Bereich zwischen wenigen Watt bis hin zu einigen kW eingestellt werden. Die erfindungsgemäße Spannungsbegrenzungsschaltung ist aber auch bei HF-Anlagen 1 mit weit aus höheren Frequenzen und weitaus größeren Leistungen einsetzbar.

In der **Fig. 2** ist eine weitere Ausführungsform einer Gleichrichterschaltung **30** dargestellt. Zwischen der Diode 26 und der zweiten Stelle 24 ist ein Kondensator **31** geschaltet und von der Anode der Diode 26 zu Masse ist eine weitere Diode **32** geschaltet, wobei ihre Anode mit Masse verbunden ist. Eine solche Schaltungsanordnung wirkt als Spannungsverdoppler. Der Kondensator 31 begrenzt den Energiefluss in die Spannungsbegrenzungsschaltung und sorgt für eine DC-Abkopplung. Mit einer solchen Schaltung kann die Diode 26 und das Einstellglied 23 vor Überlastung durch zu großen Strom geschützt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Begrenzung der an einem Bauelement (Leistungstransistor 7) in einem Hochfrequenz-Pfad (HF-Pfad) einer Hochfrequenzanregungsanordnung aufgrund von Störungen anliegenden Spannung, Strom oder Leistung mit den Verfahrensschritten:
 - a) Abgreifen eines Hochfrequenz-Signals (HF-Signal) an einer ersten beliebigen Stelle (12) des HF-Pfads;
 - b) Entziehen von Energie aus dem HF-Pfad, wenn das an der ersten Stelle (12) abgegriffene HF-Signal einen Referenzwert überschreitet.dadurch gekennzeichnet, dass aus dem an der ersten Stelle (12) abgegriffenen HF-Signal ein gleichgerichteter Spitzenwert und/oder eine dazu proportionale Größe generiert wird und mit dem Referenzwert verglichen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Entziehen von Energie durch Abgreifen eines HF-Signals an einer zweiten Stelle (24) des HF-Pfads erfolgt, wobei das abgegriffene HF-Signal in ein Gleichspannungssignal gewandelt wird und dieses begrenzt oder abgesenkt wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das HF-Signal an der ersten Stelle (12) in unmittelbarer Nähe eines vor einer Spannung zu schützenden Bauelements (7) abgegriffen wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Änderungen des HF-Signals an der ersten Stelle mit einer Reaktionsgeschwindigkeit $\leq$

100µs, insbesondere $\leq 10\mu\text{s}$, vorzugsweise $\leq 1\mu\text{s}$ erfasst werden.

5. Hochfrequenzanregungsanordnung mit einem einen HF-Generator (2) umfassenden HF-Pfad von dem HF-Generator (2) zu einem Lastanschluss (11) der Hochfrequenzanregungsanordnung, wobei zum Schutz von Bauelementen (7) im HF-Pfad eine Begrenzungsschaltung vorgesehen ist, die eine mit einer ersten Stelle (12) des HF-Pfads verbundene, aus einem Vergleich eines HF-Signals mit einem Referenzwert ein Ausgangssignal erzeugende Ansteuerschaltung und einen ebenfalls mit dem HF-Pfad verbundenen Energiewandler umfasst, wobei die Ansteuerschaltung mit dem Ausgangssignal den Energiewandler ansteuert, der der Hochfrequenzanregungsanordnung Energie entzieht, wenn der Referenzwert überschritten wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Ansteuerschaltung ein Spitzenwerterfassungsglied (13) umfasst, dessen Ausgang mit einem den Energiewandler ansteuernden Vergleichler (21) verbunden ist.
6. Hochfrequenzanregungsanordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiewandler eine aus dem HF-Signal eine Gleichspannung erzeugende Gleichrichterschaltung (25, 30) umfasst.
7. Hochfrequenzanregungsanordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichrichterschaltung (25, 30) eine Diode (26) und einen mit Masse verbundenen Kondensator (27) umfasst.
8. Hochfrequenzanregungsanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiewandler ein Einstellglied (23) umfasst.

9. Hochfrequenzanregungsanordnung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Einstellglied (23) als einstellbarer Widerstand ausgebildet ist.
10. Hochfrequenzanregungsanordnung nach einem der Ansprüche 5 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Spitzenwerterfassungsglied (13) einen Spannungsteiler (14) und einen nachgeschalteten Spitzenwertgleichrichter (19) aufweist.
11. Hochfrequenzanregungsanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche 5 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Ausgänge des Spitzenwerterfassungsglieds (13) und/oder des Vergleichers (21) mit einer Steuereinheit verbunden sind.

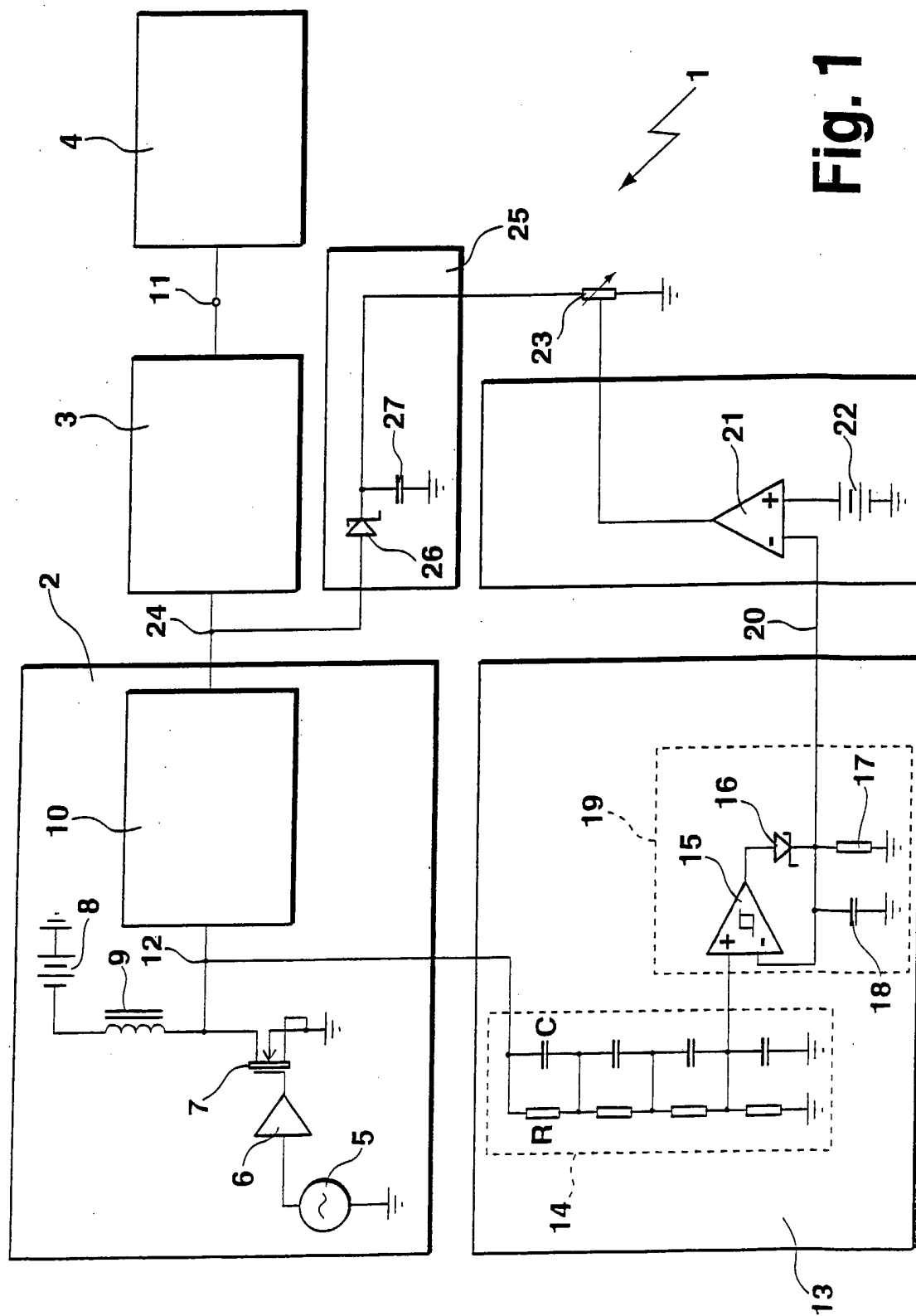
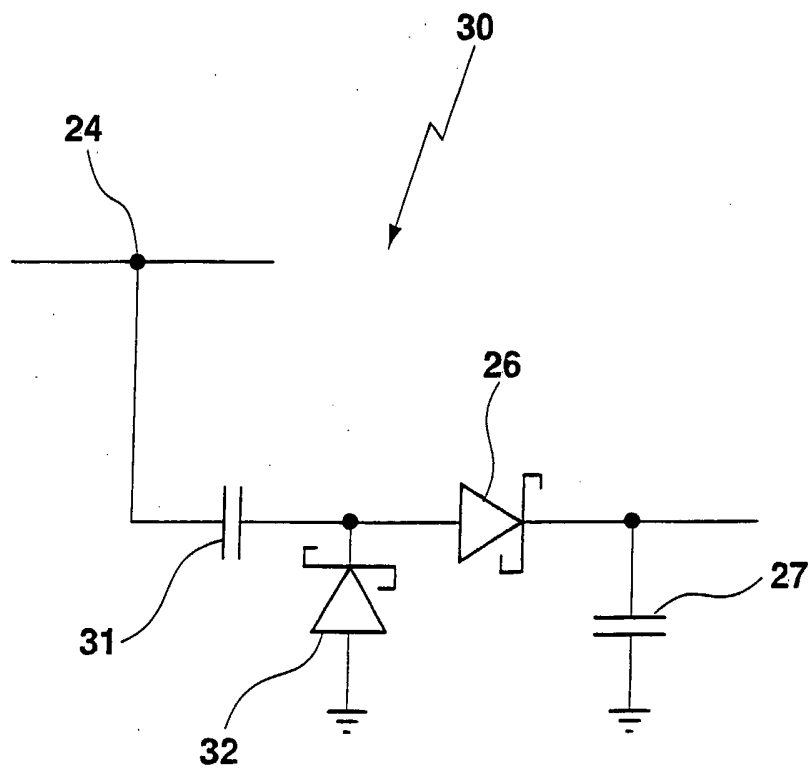


Fig. 1

2/2

**Fig. 2**