(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2008 000 511 T5** 2010.01.07

(12) # Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2008/105985**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2008 000 511.7**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2008/000908**
(86) PCT-Anmeldetag: **24.01.2008**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **04.09.2008**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **07.01.2010**

(51) Int Cl.[8]: ***H03F 1/08*** (2006.01)
H03F 1/56 (2006.01)
H01S 3/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
11/711,192 **27.02.2007** **US**

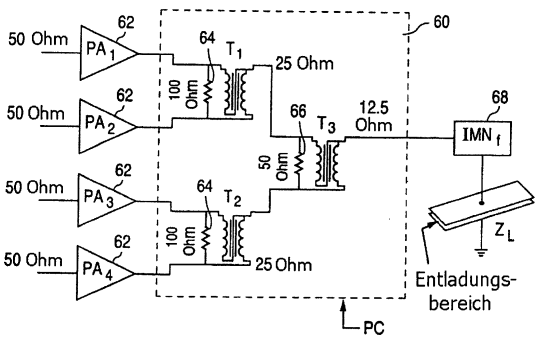
(71) Anmelder:
Coherent, Inc., Santa Clara, Calif., US

(74) Vertreter:
WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und Rechtsanwälte, 81541 München

(72) Erfinder:
Knickerbocker, Howard, Middlefield, Mass., US;
Hauer, Frederick W., Windsor, Conn., US

(54) Bezeichnung: **Leistungsaddierer**

(57) Hauptanspruch: Binäre Leistungsaddierer-Schaltung umfassend:
einen ersten Transformator, der eine von einem ersten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe und eine von einem zweiten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe kombiniert, um eine erste Transformatorausgabe bereitzustellen;
einen ersten Differenzwiderstand, der zwischen den Ausgang des ersten Leistungsverstärkers und den Ausgang des zweiten Leistungsverstärkers geschaltet ist;
ein zweiter Transformator, der eine von einem dritten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe und eine von einem vierten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe kombiniert, um eine zweite Transformatorausgabe bereitzustellen;
einen zweiten Differenzwiderstand, der zwischen den Ausgang des dritten Leistungsverstärkers und den Ausgang des vierten Leistungsverstärkers geschaltet ist;
einen dritten Differenzwiderstand, der zwischen den ersten Transformatorausgang und den zweiten Transformatorausgang geschaltet ist; und
ein dritter Transformator, der verschaltet ist, um die erste Transformatorausgabe und die zweite Transformatorausgabe zu kombinieren, um eine dritte Transformatorausgabe direkt an einer Last bereitzustellen.



Beschreibung

Technisches Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft Lasersysteme und insbesondere HF-Leistungsaddierer zur Verwendung in HF-Festkörper-Leistungversorgungen für diffusionsgekühlte CO_2-Slablaser mittlerer Leistungsabgabe.

Hintergrund

[0002] Es ist wohl bekannt, dass für eine feste Trennung (D) zwischen zwei rechteckigen Elektroden mit einer Breite (W) und einer Länge (L), die Ausgangsleistung eines diffusionsgekühlten CO_2-Slablasers linear mit dem Bereich der Elektrode gestaffelt ist. Der Optimalwert der Trennung D zwischen den Elektroden wird hauptsächlich durch den Gasdruck, die Wellenlänge des Lasers und die HF-Frequenz der Leistungversorgung bestimmt, die verwendet wird, um die Entladung zwischen den zwei Elektroden anzuregen. Ein typischer Gasdruck liegt um 50–150 Torr; eine typische Wellenlänge liegt um 9–11 Mikrometer; typische Frequenzen liegen um 80–100 MHz. Für diese Druckbereiche und HF-Frequenzbereiche liegt die Elektrodentrennung D um 0,05–0,13 Inch. Bei diesen Druckbereichen, Frequenzbereichen und Bereichen der Elektrodentrennung liegt die an der Entladung angelegte HF-Spannung, die benötigt wird, um einen diffusionsgekühlten CO_2-Laser optimal zu betreiben, bei ungefähr 225 Volt.

[0003] Von dem wohl bekannten Spannung, Strom, Leistungsverhältnis I = P/V, steigt der Strom in die Entladung für eine konstante an den Elektroden angelegte Spannung linear mit der HF-Leistung in die Entladung an, wie schematisch durch die durchgezogene gerade Linie **10** in Fig. 1 dargestellt. Aus dem wohl bekannten Leistung, Spannung, Impedanzverhältnis $Z = V^2/P$, nimmt die Impedanz der Entladung wie die Inverse der Leistung ab, wenn die HF-Leistung in die Entladung erhöht wird, wie schematisch durch die gestrichelte gekrümmte Linie **12** in **Fig.** 12 dargestellt.

[0004] Abhängig von den Parametern des Lasers tritt eine 50 Ohm Impedanz für die Entladung eines diffusionsgekühlten CO_2-Lasers typischerweise bei einer Ausgangsleistung von ungefähr 100–150 W auf. Nimmt man eine Lasereffizienz von 10% an, tritt diese Laser-Ausgangsleistung für eine Eingangs-HF-Leistung in die Entladung von ungefähr 1000–1500 W auf. Unter diesem HF-Leistungsbereich ist die Entladungsimpedanz gewöhnlich höher als 50 Ohm; über diesem Leistungsbereich ist die Entladungsimpedanz gewöhnlich geringer als 50 Ohm. Demzufolge sind die Herausforderungen bei der Gestaltung von Festkörper-HF-Leistungsverstärkern, -Leistungsaddierern und -Impedanzanpassungsnetzwerken zur effektiven Leistungskopplung in die Entladung für die zwei Situationen verschieden.

[0005] Typischerweise werden Festkörper-HF-Leistungsaddierer entworfen, um 50 Ohm oder höhere Lasten, wie in FM Funksendern, zu betreiben. Festkörper-HF-Leistungsaddierer zum Betreiben geringer Impedanzlasten (d. h. << 50 Ohm) sind ziemlich einzigartig bei diffusionsgekühlten CO_2-Slablasern mittlerer und hoher Leistung.

[0006] Die vorliegende Erfindung stellt HF-Festkörper-Leistungsaddierer zum Betreiben niedriger Impedanzlasten (d. h. zum Betreiben diffusionsgekühlter Slablaser-Entladungen mittlerer Leistung) bereit. Die hierin offenbarten Maßnahmen bewirken auch eine Reduzierung der Kosten bei der Handhabung der hohen Ströme in dem Leistungsaddiererabschnitt der Festkörper-HF-Leistungversorgung, die aus den niederohmigen Pegeln resultiert während die Leistung in die Entladung ansteigt. Die Realisierung niederohmiger Ausgänge ist bei Festkörper-Leistungsaddierern wichtig zum effizienten Verwenden von Festkörperbauelementen (Halbleiterbauelementen) bei HF-Leistungversorgungen zum Betreiben der niedrigen Impedanz von diffusionsgekühlten CO_2-Lasern mittlerer bis hoher Leistung, um Kosten zu reduzieren und die Lasereffizienz zu erhöhen. Während die Laserausgangsleistung ansteigt, wird eine Laserleistung schließlich erreicht, an der die Verwendung von Vakuumröhrentechnologie benötigt wird, um ein kosteneffizientes Laserprodukt bereitzustellen. Es wird angenommen, dass der Laserleistungspegel, der einen Übergang von Festkörper- auf Vakuumröhrentechnologie für die HF-Leistungversorgung benötigt, über 1000 W liegt, falls die hierin offenbarten erfinderischen Maßnahmen angewendet werden.

[0007] Fig. 2 zeigt ein Schaltbild des allgemeinen herkömmlichen Ansatzes, der in Festkörper-HF-Leistungsversorgungen zum Betreiben diffusionsgekühlter CO_2-Gaslaser verwendet wird. Als ein Beispiel ist die Schaltung **20** der Fig. 2 für eine 6 KW Ausgabe ausgelegt, falls vier 300 W Transistoren (d. h. Philips BLF 278A) in jedem der fünf Leistungsverstärker (PA_1–PA_5) **22** verwendet werden. Eine Gruppe von zwei Transistoren, die in einer Gegentaktverstärkeranordnung angeordnet sind, bilden jeden Leistungsverstärker **22**. Zwei der Gegentaktverstärker sind in einer binären Leistungsaddiereranordnung angeordnet, wie sie im Stand der Technik wohl bekannt ist, um einen Leistungsverstärker zu bilden. Wenn konservativ Schaltungsverluste berücksichtigt werden, ist der in Fig. 2 dargestellte Ansatz mit den vorgegebenen Transistoren und fünf Leistungsverstärkern **22** ausreichend, um einen CO_2-Laser mit einer Durchschnittsausgangsleistung von ungefähr 500 W oder höher zu betreiben. Das Betreiben der Leistungsverstärker **22** in einem gepulstem Betriebsmodus bei Tastverhältnissen (C_Y) von weniger als eins, kann

eine HF-Spitzenleistungsausgabe (P_p) gleich zu der Durchschnittsleistung (P_a) kontinuierlicher Wellenlänge (CW; continuous wavelength) geteilt durch C_y erbringen. In diesem gepulsten Fall ist die Impedanz der Laserentladung (Z_L) geringer als in dem CW Fall, da dieser höher betrieben wird.

[0008] Der in Fig. 2 gezeigte Ansatz startet mit einem Transistoroszillator **24** mit der gewünschten Frequenz (z. B. 100 MHz). Die Ausgabe des Oszillators **24** wird einer Vorverstärkerkette (P_rA) **26** zugeleitet, so dass die Ausgangsleistung des Vorverstärkers P_rA ausreichend groß ist, um die fünf Leistungsverstärker (PA_1–PA_5) **22** in nicht linearem Betrieb für maximale Effizienz zu betreiben, was wohl bekannt ist. Die Eingänge an jedem der Leistungsverstärker (PA_1–PA_5) **22** haben HF-Signale gleicher Amplitude und gleicher Phase, um ungefähr 1200 W Ausgangs-HF-Leistung von jedem der fünf Leistungsverstärker **22** zu erhalten, wodurch eine Gesamtausgangsdurchschnittsleistung von 6000 W erreicht wird. Die Ausgabe von jedem der Leistungsverstärker **22** wird einem zugehörigen Richtkoppler (DC) **28** zugeleitet, dessen Ausgestaltung auch im Stand der Technik wohl bekannt ist. Die Signale von den Richtkopplern (DC_1–DC_5) **28** werden verwendet, um die Vorwärtsleistung (FP) an die Entladung sowie die rückgestreute Leistung (BP) von der Laserentladung zu messen.

[0009] Das Vorwärtsleistungssignal FP von den Richtkopplern (DC_1–DC_5) **28** der Schaltung aus Fig. 2 wird verwendet, um die Ausgangsleistungscharakteristik der einzelnen Leistungsverstärker **22** zu ermitteln/überwachen, um Betriebsprobleme, falls vorhanden, zu erkennen, wie beispielsweise: geben die Leistungsverstärker **22** gleiche Leistung aus. Die zurückgestreute Leistung, die in der Schaltung **20** aus Fig. 2 durch die Ansammlung von Richtkopplern (DC_1–DC_5) **28** festgestellt wird, wird verwendet, um zu überwachen, wie gut die Leistungsversorgung an die Entladung des Lasers (d. h. die Last) angepasst ist. Wenn die Entladung nicht gezündet ist, ist die Entladungsimpedanz sehr hoch (d. h. nur ein kleiner oder kein Strom fließt durch die Entladung) und ein hoher Prozentsatz der Leistung wird zurückreflektiert in Richtung des Oszillators aufgrund der großen Impedanzfehlanpassung. Wenn die zurückgestreute Leistung (BP) groß ist, wird das große BP Signal verwendet, um die Leistungsversorgung auszuschalten, um sie vor Beschädigung zu schützen. Ein Vorzünder wird normalerweise verwendet, um die Entladung zu zünden (aus Gründen der Einfachheit nicht in Fig. 2 gezeigt) und um sie gezündet zu belassen, so dass beträchtliche zurückreflektierte Leistung nicht auftritt. US Pat. Nr. 5,434,881, veröffentlicht am 18. Juli 1995, offenbart ein Zünderanordnungsbeispiel in einem CO_2 diffusionsgekühlten Slab-Laser.

[0010] Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, um Rückreflexions-Schutzschaltungen zu realisieren, die Fachleuten wohl bekannt sind. Deswegen wird solch eine Schaltung nicht in Fig. 2 gezeigt. Wenn die Entladung gezündet ist, ist die Impedanz gering und durch Bemessung wird die HF-Leistungsversorgung dazu gebracht, der gezündeten Entladungsimpedanz zu entsprechen, so dass die reflektierte Leistung gering oder null ist.

[0011] Wie weiter in Fig. 2 gezeigt, wird die Ausgabe von jedem der Richtkoppler (DC_1–DC_5) **28** an einem zugehörigen Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_1–IMN_5) **30** bereitgestellt, welches verwendet wird, um die Eingangsimpedanz von jedem der Leistungsverstärker **22** an die Impedanz der Leistungsaddierer (PC) **32** anzupassen. Im Stand der Technik wird gewöhnlich die Eingangsimpedanz der Leistungsaddierer **32** auf 50 Ohm eingestellt. Es gibt zahlreiche den Fachleuten wohl bekannte Mittel zur Erreichung dieser Impedanzanpassung zwischen den Leistungsverstärkern **22**, den Richtkopplern **28** und dem Leistungsaddierer **32** durch das Impedanzanpassungsnetzwerk **28**. Ein gebräuchlicher Ansatz ist der, einen Aufwärtstransformator des Typs zu verwenden, der in der US Provisional Application Nr. 60/810,538, eingereicht am 2. Juni 2006, durch W. S. Robotham Jr., Frederick W. Hauer und Leon A. Newman, offenbart ist; die Anmeldung Nr. 60/810,538 wird hiermit durch Bezugnahme aufgenommen.

[0012] Der Leistungsaddierer **32** und das letzte Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_f) **34**, das vor der Laserentladung **36** der Schaltung **20** von Fig. 2 angeordnet ist, sind eine der schwierigsten Einheiten bei dem Aufbau einer effizienten HF-Festkörper-Leistungsversorgung, um einen diffusionsgekühlten CO_2-Slablaser zu betreiben, der mehrere hundert Watt und mehr Ausgangsleistung aufweist, wegen der hohen Ströme die gemeinsam in den Leistungsaddierer **32** und das letzte Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_f) **34** eintreten und diese verlassen. Für gewerbliche Anwendungen muss der Leistungsaddierer **32** so wenige Komponenten wie möglich für verringerte Kosten aufweisen. Im Stand der Technik der HF-Festkörper-Leistungsversorgungen waren die Kosten für die Versorgung ungefähr gleich zu ½ der Kosten des gesamten Lasers. Die vorliegende Erfindung stellt Maßnahmen zur Verringerung dieses Kostenverhältnisses bereit.

[0013] Für Fachleute sind zahlreiche wohl bekannte Ansätze zur Ausgestaltung des Leistungsaddierers (PC) und des letzten Impedanzanpassungsnetzwerks (IMN_f) erhältlich. (Siehe z. B. Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design, Kapitel 5; Samual V. Liao; Prentice Hall, Inc. Seiten 161–192). Ein bekannter Ansatz für den Leistungsaddierer (PC) ist der, den "Wilkinson" Leistungsaddierer/-teiler zu verwenden ("An N-Way Hybrid Power Divider" by Ernest J. Wilkinson; IRE Transactions an Microwave Theory and

Techniques, Januar 1960, Seiten 311–313: siehe auch Seiten 183–184 der Liao Veröffentlichung). Ein anderer bekannter Ansatz ist die ”binäre” Leistungsaddierer/-teiler-Struktur, wie sie in Fig. 5-4-1 auf Seite 174 der Liao Veröffentlichung diskutiert wird.

[0014] Die vorliegende Erfindung stellt gegenüber dem Stand der Technik zwei Leistungsaddierer-Ausgestaltungen bereit, basierend auf Änderungen an den oben genannten Wilkinson und binären PC-Ausgestaltungen und eine vollständig neue Breitbandbevorzugte Leistungsaddierer-Ausgestaltung zur Realisierung eines effizienten, geringpreisigen Leistungsaddierers, zur Impedanzanpassung an niederohmige Lasten, die mit diffusionsgekühlte CO_2-Slablasern mittlerer Leistung des Stands der Technik in Zusammenhang stehen. Eine kurze Diskussion des Wilkinson und des binären Leistungsaddierers wird unten bereitgestellt, um die Vorzüge der vorliegenden Erfindung zu würdigen. Diese zwei vorhergehenden Ansätze sind die Ansätze, die derzeit für die Impedanzanpassung der HF-Leistungsversorgung an die Entladungsimpedanz von diffusionsgekühlten CO_2-Lasern verwendet werden, die Ausgangsleistungen unter 150–200 Watt aufweisen. Diese Laser geringer Leistung weisen höhere Impedanzen auf, z. B. um 50 Ohm und höher, als oben genannte CO_2-Laser mittlerer und höherer Leistung besitzen. Die vorliegende Erfindung verringert die Kosten von Festkörper-HF-Leistungsaddierern zum Betreiben der Entladungen von diffusionsgekühlten Slablasern, die Ausgangsleistungen von über 150–200 Watt aufweisen und demnach Eingangsimpedanzen von viel weniger als 50 Ohm aufweisen. Es ist wichtig zu bemerken, dass die Konzepte der vorliegenden Erfindung auch CO_2-Laser geringerer Leistung von entweder der Wellenleiter- oder Slablaser-Ausgestaltung anwendbar sind.

[0015] Fig. 3 stellt schematisch einen herkömmlichen 4-Weg binären Leistungsaddierer **40** dar, der den Fachleuten wohl bekannt ist. Das Beispiel der Fig. 3 weist einen 50 Ohm Eingang von vier getrennten Leistungsverstärkerquellen (PA_1–PA_4) **42** auf, die gleiche Amplituden und Phasen aufweisen und liefert eine HF-Ausgabe an eine 50 Ohm Last. In diesem Beispiel sind die vier Leistungsverstärker **42** derart gezeigt, dass jeder einen 50 Ohm Eingang aufweist, und eine Ausgabe wie sie typisch in herkömmlichen Ansätzen ist, unter Verwendung der oben bezeichneten Transistoren. Diese Anordnung stellt eine 5 KW Ausgangsleistung bei 100 MHz bereit. Ein 100 Ohm Widerstand **44** ist zwischen die Ausgänge des Leistungsverstärkers PA_1 und des Leistungsverstärkers PA_2 und zwischen dem Leistungsverstärker PA_3 und dem Leistungsverstärker PA_4 geschaltet, um jede ungleichmäßige Leistung abzuführen. Diese Widerstände **44** sind den Fachleuten als Differenzwiderstände oder Abgleichwiderstände wohl bekannt. Die Ausgaben der Leistungsverstärker PA_1/PA_2 und Leistungsverstärker PA_3/PA_4 werden jeweils durch die 1:1 Verhältnis Transformatoren T_1 und T_2 kombiniert. Die Transformatoren T_1 und T_2 wandeln die Impedanzen auf 25 Ohm an ihren jeweiligen Ausgängen um. Ein 50 Ohm Differenzwiderstand **46** ist zwischen den Ausgang des Transformators T_1 und den Ausgang des Transformators T_2 geschaltet, wodurch eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz an dem 1:1 Transformator T_3 Ausgang bereitgestellt wird. Die Standardpraxis war, diese 12,5 Ohm auf eine 50 Ohm Last Z_L, wie in Fig. 3 gezeigt, anzupassen. Ein herkömmlich verwendeter Ansatz, um diesen Impedanzanpassungsübergang zu erreichen, ist der, einen 1:2 Aufwärtstransformator T_4 zu verwenden, um die 12,5 Ohm in 50 Ohm umzuwandeln, um mit der Last (Z_L) **48** zusammenzupassen. Diese Transformatoren und Widerstände sind Hochleistungsbauelemente und deshalb sehr teure Elemente.

[0016] Fig. 4 stellt einen herkömmlichen 4-Weg Wilkinson Addierer **50** dar, der wieder typischerweise einen 50 Ohm Eingang und Ausgang aufweist. In diesem Fall werden vier Viertelwellenlängen-Koaxialübertragungsleitungen **52** verwendet, von denen jede eine charakteristische Impedanz (Wellenwiderstand) von 50 Ohm aufweist, um die Leistungsaddierung bereitzustellen. Mikrostreifenübertragungsleitungen können und werden auch oft statt der in Fig. 4 gezeigten Koaxialübertragungsleitungen verwendet. Die Enden des Außenleiters von jeder der Koaxialübertragungsleitungen **52** sind wie gezeigt mit elektrischer Erde verbunden. Ein Ende von jedem von vier Widerständen **54**, von denen jeder einen Wert von 50 Ohm aufweist, ist mit einem der Eingangsinnenleiter der vier Koaxialübertragungsleitungen wie gezeigt verbunden, wobei das gegenüberliegende Ende von jedem Widerstand mit einem gemeinsamen elektrischen Verbindungspunkt verbunden ist. Diese Widerstände **54** sind die Differenz- oder Abgleichwiderstände. Jeder der vier Zentralleiter ist an dem Ende von jeder der Übertragungsleitungen **52** mit einem anderen gemeinsamen elektrischen Verbindungspunkt verbunden, der eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz erreicht. In diesem Beispiel aus dem Stand der Technik, ist es gewöhnlich gewünscht, den gemeinsamen Verbindungspunkt mit einer 50 Ohm Last zu verbinden, die um einiges entfernt angeordnet ist. Dies wird typischerweise, wie in Fig. 4 gezeigt, durch die Verwendung einer λ/4 Länge oder eines Vielfach-¼-Wellenlängen-Koaxialkabels mit 25 Ohm Wellenwiderstand erreicht. Die Verwendung von ¼-Wellenlängen-Übertragungsleitungen macht diese Technologie schmalbandig im Vergleich zu dem Ansatz aus Fig. 3. Die Abgleichwiderstände sind wieder hochpreisige Elemente.

[0017] Abwandlungen der in Fig. 3 und Fig. 4 gezeigten Leistungsaddierer können verwendet werden und werden verwendet, um diffusionsgekühlte CO_2-Laser mit Ausgangsleistungen zwischen mehre-

ren zehn bis über 500 Watt zu betreiben, durch Hinzufügen eines Impedanzanpassungsnetzwerks (IMN_f) vor der Entladungsverbindung und durch Anpassen der IMN_f-Bauteile derart, dass die Impedanz von jedem der Leistungsaddierer aus Fig. 3 oder Fig. 4 bei Sicht in das IMN_f 50 Ohm ist. Die Verwendung von solchen Leistungsaddierer-Technologien des Stands der Technik resultiert darin, dass die Kosten der HF-Leistungsversorgung ungefähr gleich zu den Kosten des Laserkopfs sind. Die vorliegende Erfindung verringert dieses Kostenverhältnis zwischen der HF-Leistungsversorgung und dem Laserkopf.

[0018] Zum Beispiel würde die Beseitigung des Ausgangsimpedanztransformators T_4 in dem Leistungsaddierer der Fig. 3 in einer erheblichen Kostenreduktion resultieren. Zusätzlich ist die niedrige Ausgangsimpedanz von 12,5 Ohm aus dem Transformator T_3 näher an die niedrige Eingangsimpedanz der Entladung eines Lasers mittlerer Ausgangsleistung angepasst. Zum Beispiel ist es wahrscheinlich, dass die Entladungsimpedanz eines 500 W Lasers um 6 Ohm liegt. Diese nähere Impedanzanpassung verringert auch die Kosten des IMN_f, das benötigt wird, um den 12,5 Ohm Ausgang des Leistungsaddierers an die 6 Ohm Impedanz der Entladung anzupassen. Hochleistungs-HF-Transformatoren sind teuer und stellen zusätzliche Leistungsverluste in den Leistungszuführschaltungen dar, wodurch der Gesamtwirkungsgrad des Lasers verringert wird.

[0019] Die Hochleistungs-λ/4-Übertragungsleitungs-Impedanztransformatoren, die in dem Leistungsaddierer der Fig. 4 gezeigt sind, stellen ebenso zusätzliche Verluste und Paketierungsherausforderungen aufgrund der Längen und des Durchmessers der Koaxialleitung oder dem Bedürfnis nach angemessener Kühlung dar. Der Betrieb bei niedriger Ausgangsimpedanz für den Leistungsaddierer, führt zu einer geringeren Schaltungs-Q, was zu verringerten umlaufenden Stromverlusten in der Impedanzanpassungsschaltung (IMN_f) zwischen dem Addiererausgang und der Laserentladung führt.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0020] Fig. 1 ist eine graphische Darstellung, die das allgemeine Strom- und Impedanzverhalten als eine Funktion der HF-Leistung in diffusionsgekühlten CO_2-Laserentladungen zeigt.

[0021] Fig. 2 ist eine schematische Darstellung, die eine Festkörper-HF-Leistungsversorgung zum Betreiben eines CO_2 diffusionsgekühlten Lasers zeigt.

[0022] Fig. 3 ist eine schematische Darstellung, die einen herkömmlichen binären 4-Weg Leistungsaddierer zeigt.

[0023] Fig. 4 ist eine schematische Darstellung, die einen herkömmlichen 4-Weg Wilkinson Leistungsaddierer zeigt.

[0024] Fig. 5 ist eine schematische Darstellung, die einen 4-Weg Leistungsaddierer in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0025] Fig. 6 ist eine schematische Darstellung, die einen 4-Weg Wilkinson Leistungsaddierer in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0026] Fig. 7 ist eine schematische Darstellung, die eine alternative Ausführung eines HF-Leistungsaddierers in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0027] Fig. 8a und Fig. 8b sind perspektivische Zeichnungen, die die Paketierung eines Leistungsaddierers in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0028] Fig. 9 ist ein Blockdiagramm, das eine HF-Leistungsversorgung zeigt, die einen Leistungsaddierer verwendet, der eine CO_2 Laserentladung in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung betreibt.

[0029] Fig. 10 stellt Computersimulationsdaten des Betriebs eines Leistungsaddierers in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung bereit.

[0030] Fig. 11 stellt Computersimulationsdaten bereit, die die Veränderung im Phasenwinkel unter den gleichen Bedingungen wie in Fig. 10 als eine Funktion der Koaxialkabellänge zeigt.

Detaillierte Beschreibung

[0031] Fig. 5 zeigt einen veränderten 4-Weg binären Leistungsaddierer **60** in Übereinstimmung mit den Konzepten der vorliegenden Erfindung, der kosteneffizient verwendet werden kann, um geringe Entladungsimpedanzen zu betreiben. Die in Fig. 5 gezeigte 4-Weg Ausführungsform ist nur als ein Beispiel bereitgestellt und sollte nicht als die Erfindung einschränkend betrachtet werden. Die Fachleute werden verstehen, dass andere Viel-Weg binäre Leistungsaddierer-Ausführungsformen innerhalb des Geistes und Schutzbereichs der Erfindung liegen.

[0032] Der Vergleich des Leistungsaddierers **40** aus Fig. 3 und des Leistungsaddierers **60** aus Fig. 5 der vorliegenden Erfindung zeigt, dass der Transformator T_4 aus der Schaltung der Fig. 3 beseitigt ist, um die Schaltung **60** der Fig. 5 zu erhalten. Das heißt, der Leistungsaddierer **60** empfängt, wie in Fig. 5 gezeigt und wie in der Schaltung **40** der Fig. 3, eine 50 Ohm Eingabe von vier getrennten Leistungsverstärker-

quellen (PA_1–PA_4) **62**, die gleiche Amplitude und Phase aufweist, und liefert eine HF-Ausgabe an eine 50 Ohm Last. Ein 100 Ohm Widerstand **64** ist zwischen den Ausgängen des Leistungsverstärkers PA_1 und des Leistungsverstärkers PA_2 und zwischen dem Leistungsverstärker PA_3 und dem Leistungsverstärker PA_4 geschaltet. Die Ausgänge der Leistungsverstärker PA_1/PA_2 und der Leistungsverstärker PA_3/PA_4 werden jeweils durch 1:1 Verhältnis Transformatoren T_1 und T_2 kombiniert. Die Transformatoren T_1 und T_2 wandeln die Impedanzen an ihren jeweiligen Ausgängen in 25 Ohm um. Ein 50 Ohm Differenzwiderstand **66** ist zwischen den Ausgang des Transformators T_1 und den Ausgang des Transformators T_2 geschaltet, wodurch eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz an dem Ausgang des Transformators T_3 bereitgestellt wird. Dies versorgt den Leistungsaddierer **60** mit einer 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz, die direkt dem Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_f) **68** zugeleitet wird. Das Impedanzanpassungsnetzwerk IMN_f kann aus einem P_i (π) Netzwerk aus zwei Kondensatoren und einer Spule oder anderen den Fachleuten bekannten Impedanzanpassungsnetzwerken bestehen. Das IMN_f ist effizient, weil nur eine geringe Menge einer Impedanzanpassung notwendig ist, um eine Anpassung zwischen 12,5 Ohm und 6,0 Ohm zu erreichen. Es ist zu bemerken, dass es keine Übertragungsleitung gibt, die den Ausgang des Leistungsaddierers **60** mit dem IMN_f verbindet, so dass die Verbindungen zwischen dem Ausgang des Transformators T_3 und dem IMN_f und dem IMN_f und den Laserelektroden in einer kurzen Distanz angeordnet werden müssen. Die Details darüber, wie diese kurze Verbindung erreicht werden kann, werden nachstehend in Verbindung mit **Fig.** 8 beschrieben. Diese veränderte binäre Leistungsaddierer-Ausgestaltung weist eine geringere Menge an Teilen und den Vorteil geringerer Kosten gegenüber der in Fig. 3 gezeigten herkömmlichen Ausgestaltung auf.

[0033] Fig. 6 zeigt einen veränderten 4-Weg Wilkinson Leistungsaddierer **70** in Übereinstimmung mit den Konzepten der vorliegenden Erfindung mit einem 50 Ohm Eingang und 12,5 Ohm Ausgang, der geeignet ist zum Betreiben von niederohmigen Entladungen. Der Vergleich der Ausgestaltung **70** aus Fig. 6 und der herkömmlichen Ausgestaltung **50** aus Fig. 5 zeigt, dass der Koaxialübertragungsleitungs-Transformator, der den Leistungsaddierer mit der Last verbindet, beseitigt ist. Dies stellt den Leistungsaddierer **70** aus Fig. 6 mit einer 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz und dem Vorteil der Einsparung der Menge an Teilen/von Kosten bereit.

[0034] Wie in Fig. 6 gezeigt und wie in der Schaltung **50** aus Fig. 4, werden vier Viertelwellenlängen-Koaxialübertragungsleitungen **72** verwendet, von denen jede einen 50 Ohm Wellenwiderstand aufweist, um die Leistungsaddierung bereitzustellen. Die Enden der Außenleiter von jeder der Koaxialübertragungsleitungen **72** sind mit elektrischer Erde verbunden. Ein Ende von jedem von vier 50 Ohm Widerständen **74** ist mit einem der Eingangsinnenleiter der vier Koaxialübertragungsleitungen **72** verbunden; das gegenüberliegende Ende von jedem Widerstand **74** ist mit einem gemeinsamen elektrischen Verbindungspunkt verbunden. Jeder der vier Zentralleiter an dem Ende der Koaxialübertragungsleitungen **72** ist mit einem gemeinsamen elektrischen Verbindungspunkt verbunden, um eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz zu erreichen. Die 12,5 Ohm Ausgabe des Leistungsaddierers **70** wird direkt dem Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_f) **76** und dann der Laserentladung zugeleitet, in ähnlicher Weise zu der der Ausgestaltung aus Fig. 5. Die kurze Verbindung zwischen dem Ausgang des Leistungsaddierers **70** und dem IMN_f und dem IMN_f und den Laserelektroden kann auch wie in **Fig.** 8 gezeigt gebildet werden. Die Viertelwellenlängen-Übertragungsleitungen **72** versorgen den Leistungsaddierer aus Fig. 6 mit einer viel geringeren Bandbreite als mit dem in Fig. 5 gezeigten Leistungsaddierer erhältlich ist. Dieser Ansatz weist geringere Kosten auf als der Leistungsaddierer aus Fig. 5.

[0035] Fig. 7 zeigt einen bevorzugten Leistungsaddierer **80** zum Betreiben einer niederohmigen diffusionsgekühlten Slablaser-Entladung. Der Vergleich der Ausgestaltung **80** aus Fig. 7 mit den PC-Ansätzen aus Fig. 5 und Fig. 6 zeigt, dass dieser Ansatz einfacher ist, weniger Bauteile aufweist und demnach geringere Kosten aufweist. Da er keine Viertelwellenlängen-Übertragungsleitungen benötigt, weist er auch eine größere Bandbreite auf als die Ausgestaltung aus Fig. 6. Der Leistungsaddierer **80** aus Fig. 7 sollte demnach einen breiteren Anwendungsbereich haben, als nur das Betreiben von Laserentladungen. Eine dieser Anwendungen könnte in Funksendern liegen, die Antennen betreiben.

[0036] Es wird geschätzt, dass eine HF-Leistungsversorgung, die den in Fig. 7 gezeigten Leistungsaddierer **80** verwendet, ungefähr 40 Prozent geringere Kosten aufweisen würde als eine Leistungsversorgung, die die entweder in Fig. 3 oder in Fig. 4 gezeigten PCs verwendet. Dieser unkonventionelle, geringpreisige, Breitband 4-Weg Addierer ist einzigartig anwendbar zur Verwendung mit Festkörper-HF-Verstärkern, die in CO_2-Laserleistungsversorgungen verwendet werden. Dieser neue Addierer kann in der gepulsten HF-Leistungsversorgung verwendet werden, die einen Super-Puls 400 Watt Laser betreibt. Er kann verwendet werden, um entweder CO2-Laser kontinuierlicher Wellenlänge (CW) oder gepulste CO_2-Laser zu betreiben.

[0037] Dieser unkonventionelle Leistungsaddierer-Ansatz ist einiges weniger kostspielig herzustellen, aber er stellt weniger Steuerung von individuellen Verstärker-Lastimpedanzen bereit als die Leistungs-

addierer aus Fig. 5 und Fig. 6. Es ist durch Versuche herausgefunden worden, dass die Steuerung von individuellen Verstärker-Lastimpedanzen in einem 5-Weg Leistungsaddierer zum Betreiben von niederohmigen Entladungen gut genug ist. Entladungen sind mit hervorragendem Ergebnissen betrieben worden, wo N gleich 5,0 war. Computersimulationen des Verhaltens des Leistungsaddierers **80** aus Fig. 7, deuteten bei bewusst ungleichmäßigen Eingaben auch an, dass die Steuerung mehr als ausreichend ist. Es ist experimentell herausgefunden worden, dass Fehler von benachbarten Verstärkern nicht in einem 6000 Watt Prototyp aufgetreten sind, wenn ein Verstärker aus den fünf Verstärkern dazu gebracht wurde, absichtlich einen Teilfehler zu erleiden.

[0038] Es ist vernünftig, dass die Ausgangsleistung und Ausgangsimpedanz der Leistungsverstärker (PA_1–PA_5) **82** in dem Leistungsaddierer **80** aus Fig. 7 typischerweise innerhalb von 10% angepasst sind, um zusätzlichen Leistungsverlust und Wellenformstörungen zu minimieren, die den benachbarten Leistungsverstärkern auferlegt sind. Da eine Impedanzanpassung normalerweise für alle Leistungsaddierer zum optimalen Betrieb ausgeführt wird, legt dies nicht eine ungewöhnliche Last auf die Ausgestaltung aus Fig. 7.

[0039] Für den in Fig. 7 gezeigten 5-Weg Addierer **82**, bei dem der Summenknoten **84** wie gezeigt angemessen abgeschlossen ist, haben Computersimulationen gezeigt, dass eine 50% Leistungsreduzierung eines Leistungsverstärkers **82** zu den effektiven Lastimpedanzen, gesehen durch die anderen vier übrigen Leistungsverstärker **82**, innerhalb eines 1,3:1 Spannungs-Stehwellenverhältnisses (VSWR) führt. Dies ist sehr akzeptabel und kann durch die geringen internen Verluste des Hochspitzenleistungstransistors bewältigt werden.

[0040] Experimente haben angedeutet, dass ein vollständiges Fehlen von einem der vier Transistoren, die einen Leistungsverstärker **82** bilden, darin resultiert, dass die effektiven Lastimpedanzen, gesehen durch die vier übrigen Leistungsverstärker **82**, innerhalb eines 2:1 Spannungs-Stehwellenverhältnisses (VSWR) liegen, solange jeder der anderen drei Transistoren innerhalb des beschädigten Leistungsverstärkers im Hinblick auf die Ausgangsleistung gut angepasst ist.

[0041] Wie in Fig. 7 gezeigt, wird eine typische Ausführungsform Zo = 50 Ohm Übertragungsleitungen **86** für alle Addiereingänge verwenden, wobei alle Übertragungsleitungen **86** die gleiche Länge aufweisen. Die Aufsummierungsknotenimpedanz ist dann Zo/N. Für N = 5, ist die Summenknotenimpedanz, wie in Fig. 7 gezeigt, 10 Ohm. Dieser bevorzugte Leistungsaddierer-Ansatz benötigt keine Differenz-(d. h. Abgleich-)Widerstände, um ungleichmäßige Verstärkerausgangsleistungen abzuleiten. Die Länge der fünf Übertragungsleitungen **86** ist nicht wichtig, aber, wie oben genannt, müssen alle dieselbe Länge aufweisen, um eine gleiche Phasenverschiebung an dem Addierknoten beizubehalten. Der Leistungsaddierer **80** aus Fig. 7 kann deshalb bei drastisch geringeren Kosten und geringerer Komplexität realisiert werden als die veränderten herkömmlichen Leistungsaddierer-Ausgestaltungen aus Fig. 5 und Fig. 6.

[0042] Wie oben in Bezug auf Fig. 5 und Fig. 6 diskutiert, macht die niedrige Ausgangsimpedanz, die natürlich mit dieser bevorzugten PC-Ausführungsform erhalten wird, es einfacher, die IMN_f-HF-Eingangsimpedanz sowohl an die CO_2-Laserentladung als auch an die PC-Ausgangsimpedanz anzupassen.

[0043] Vom Kosten- und Lasereffizienz-Standpunkt ist es wünschenswert, dass die HF-Leistungsversorgung direkt auf dem Laserröhren-Gehäuse angebracht ist. Solch eine Befestigung ist besonders wünschenswert zum direkten Befestigen des Lasers auf einem Roboterarm, weil dies das halbflexible HF-Leistungskabel beseitigt, welches dazu neigt unter mehrfachem Biegen zu brechen. Das Befestigen der HF-Leistungsversorgung direkt an dem Laserröhren-Gehäuse erfordert, dass der Abstand zwischen dem Ausgang der Leistungsversorgung und der Laserentladungs-Verbindung kurz ist (d. h. zwischen dem Ausgang zwischen dem gemeinsamen Knoten elektrischer Verbindungspunkte der PCs aus Fig. 6 und Fig. 7, und der HF-Verbindung mit den Elektroden innerhalb des Lasergehäuses, das die Elektroden, Spiegel des optischen Resonators und das CO_2:N_2:He Gasgemisch enthält) für die PC-Ausführungsformen aus Fig. 5, Fig. 6 und Fig. 7. Ein zusätzlicher Vorteil des Befestigens der Leistungsversorgung auf der Laserröhre ist der, dass Flüssigkeitskühlung von sowohl der Laserröhre als auch der HF-Leistungsversorgung leichter ermöglicht wird und bei geringeren Kosten durchgeführt wird. Es gibt zahlreiche Mittel zum Realisieren dieser kurzen HF-Verbindung zwischen dem PC-Ausgang und den Laserelektroden.

[0044] Fig. 8a zeigt schematisch einen Überblick einer bevorzugten Paketieranordnung zum Befestigen der HF-Leistungsversorgung an der Laserröhre, die die Gasmischung, die Spulen, die Elektroden und den optischen Resonator enthält. Fig. 8b zeigt mehr Details eines HF-Leistungsversorgungspakets, das jeden der in Fig. 5, Fig. 6 oder Fig. 7 dargestellten Leistungsaddierer eingliedert. Das ist der bevorzugte allgemeine Paketierungsansatz für einen 500 W Laser. Wie in Fig. 8a gezeigt, verwendet die Leistungsversorgung fünf Leistungsverstärker-Leiterplatten (PCBs), wobei drei PCBs auf einer Seite einer Kühlplatte angeordnet sind und zwei PCBs auf der gegenüberliegenden Seite mit einem anderen PCB für die

Oszillator-/Treiberschaltung angeordnet sind. Diese sechste Platte kann auch die Leistungssteuerung und das in Fig. 9 gezeigte Schutzschaltungs-Untersystem enthalten. Jede Leistungsverstärker PA Platine weist vier Leistungstransistoren als auch die Richtkoppler DC und die oben diskutierten IMNs auf.

[0045] In den oben beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung liegt die Länge eines λ/4 Teflon 50 Ohm Koaxialkabels in der Umgebung von 20 Inch (d. h. 51 cm); die Länge der CO_2-Laserröhre ist 30 cm lang. Demzufolge ist die Länge der Koaxialkabel ausreichend, um die Enden von allen der 50 Ohm Kabel von jeder der Leiterplatten zu einem gemeinsamen Knotenpunkt, zum Verbinden mit dem Impedanzanpassungsnetzwerk innerhalb der in Fig. 8b gezeigten IMN_f-Box zu bringen. Die bevorzugte verwendete IMN_f-Schaltung ist ein zwei Kondensatoren/ein Spulen-Netzwerk in einer Pi (π) Konfiguration. Andere Netzwerkkonfigurationen könnten auch verwendet werden, wie beispielsweise ein ein Spulen/ein Kondensator-Netzwerk in einer L Konfiguration. Impedanzabgleichanpassungen werden primär durch Anpassen des Werts der Kondensatoren ausgeführt. Der Ausgang des IMN_f ist mit der nächsten Metalllaserelektrode innerhalb des Laserröhren-Gehäuses verbunden. Die Breitenabmessungen der zwei parallelen Metalllaserelektroden, die durch die Distanz "D" getrennt sind, sind vertikal innerhalb des Laserröhren-Gehäuses angeordnet. Die Längen der parallelen Elektroden liegen entlang der Länge des Laserröhren-Gehäuses. Die gegenüberliegende Laserelektrode ist mit dem Metallgehäuse des Laserröhren-Gehäuses verbunden, welches als elektrische Erde dient. Die elektrische Erdung der Laserröhre, die die HF-Entladung enthält, verhindert, dass Streu-HF-Strahlung aus der Laserröhre austritt.

[0046] Die Ausführungsform der Erfindung aus Fig. 7 hat die geringsten Kosten, aber geringeren Ausgleichsschutz und die größte Bandbreite gegenüber den in Fig. 5 und Fig. 6 gezeigten Ansätzen. Dieses Merkmal großer Bandbreite ist attraktiv für Anwendungen, die große Bandbreiten benötigen, wie beispielsweise bei Anwendungen bei denen Funksender Antennen betreiben. Es ist wohl bekannt, dass die optimale Entladungszünd-HF-Frequenz verschieden ist von der optimalen HF-Frequenz, die benötigt wird, um die Entladung effizient zu betreiben, sobald sie gezündet ist. Das Merkmal großer Bandbreite des Leistungsaddierers aus Fig. 7 macht ihn attraktiv zum Handhaben dieses Merkmals verschiedener Frequenz.

[0047] Die Ausführungsform aus Fig. 6 ist teurer zu realisieren als die Ausführungsform aus Fig. 7, aber bietet einen besseren Ausgleichsschutz. Ihr schmalbandiges Merkmal ist ein Nachteil in ihrer Fähigkeit, die Differenz bei der optimal Auslösungs- und CW-Betriebs-Frequenz zu bewältigen. Glücklicherweise ist der zusätzliche Ausgleichsschutz nicht notwendig bei der Laserentladungsbetreibungs-Anwendung. Daten deuten an, dass der in Fig. 7 gezeigte Ansatz mehr als ausreichenden Ausgleichsschutz für die beabsichtigten Anwendungen des Betreibens von niederohmigen CO_2-Laserentladungen bietet.

[0048] Die Ausführungsform aus Fig. 5 (d. h. der modifizierte binäre PC) ist am teuersten zu realisieren, um diffusionsgekühlte CO_2-Slablaser in dem mittleren Ausgangsleistungsbereich von wenigen Hundert bis ein Kilowatt zu betreiben. Der erhöhte Kostenaufwand steht hauptsächlich mit den Transformatoren in Zusammenhang.

[0049] Fig. 9 zeigt ein vollständigeres Schaltbild der HF-Leistungsversorgung, die den in Fig. 7 gezeigten günstigen, breitbandigen 5-Weg Leistungsaddierer **80** verwendet. Wie in Fig. 9 gezeigt, wird ein Oszillator **90** fester oder variabler Frequenz verwendet, um die HF-Frequenz festzulegen, um die Laserentladung (wie auch in Fig. 2 gezeigt) zu betreiben. Das Oszillatorsignal wird einer Kette von Treiberverstärkern **92** zugeleitet, um die Leistung auf einen Pegel zu erhöhen, der ausreichend ist, um die fünf HF-Leistungsverstärker **94** zu betreiben. Die Ausgabe der Treiberverstärkerkette wird durch den 5-Weg Verteiler **96** in fünf Signale gleicher Amplitude aufgeteilt, die alle die selbe Phase aufweisen. Es gibt zahlreiche Wege, um diesen Verteiler **96** zu realisieren, die alle den Fachleuten wohl bekannt sind; deshalb werden aus Gründen der Einfachheit Details des Verteilers **96** nicht bereitgestellt. Die fünf Signale von dem Verteiler **96** werden den entsprechenden einzelnen HF-Leistungsverstärkern **94** zugeleitet. Jeder der HF-Leistungsverstärker-Ausgänge wird an einem entsprechenden getrennten 50 Ohm Koaxialkabel **98** bereitgestellt. Alle fünf Kabel **98** haben beliebige Längen, aber sie müssen alle von gleicher Länge sein. Die Ausgänge der fünf Kabel **98** sind mit einem gemeinsamen Punkt **100** verbunden. Der in der elektrischen Energiewirtschaft verwendeten Terminologie folgend, wird dieser gemeinsame elektrische Verbindungspunkt **100** als die "wire-nut" bezeichnet. Dieser gemeinsame HF-Verbindungspunkt **100** ist auch schematisch in Fig. 8b gezeigt, um die kombinierte HF-Leistung von den fünf Kabeln von den fünf Leistungsverstärker-Platinen zu dem Impedanzanpassungsnetzwerk (IMN_f) zu bringen. Zur Einfachheit werden die fünf Kabel nicht in Fig. 8b gezeigt. Das IMN_f ist nicht in Fig. 9 gezeigt. Ein im Stand der Technik wohl bekannter HF-Leistungssensor **102** kann verwendet werden, um die Leistung an dem gemeinsamen Knoten-Verbindungspunkt **100** zu überwachen und um diese Information an einem Leistungssteuerungs- und Schutzschaltungs-Untersystem **104** bereitzustellen, welches auch auf einer der sechs Leiterplatten aus Fig. 8a/Fig. 8b befestigt ist. Die Ausgangsleistung von der Laserröhre wird durch einen Detektor überwacht, welcher auch im Stand der

Technik wohl bekannt ist. Das Leistungssteuerungs- und Schutzschaltungs-Untersystem **104** kann auch Signale von dem Oszillator **90**, von dem Ausgang des Treiberverstärkers **92**, von jedem der HF-Leistungsverstärker **94** mittels Richtkopplern (gezeigt in Fig. 2), und von einer Gleichstrom-Leistungsversorgung **106** empfangen, die Gleichstrom-Leistung an jedem der genannten Module bereitstellt. Dies ermöglicht es dem Leistungssteuerungs- und Schutzschaltungs-Untersystem **104** jedes Korrektursignal zu überwachen und an den Modulen bereitzustellen, falls unspezifizierte Veränderungen entweder bei der Ausgangsleistung des Lasers oder bei der Ausgangsleistung der HF-Leistungsversorgung auftreten.

[0050] Wie oben genannt zeigt Fig. 9 den Leistungsaddierer aus Fig. 7 in der bevorzugten Ausführungsform eines von einer CO_2-Laser-HF-Leistung versorgten Systems. Es ist den Fachleuten bekannt, dass die Schutzschaltung verwendet werden kann, um das Lasersystem auszuschalten, wenn ein Fehler in einem oder mehreren der HF-Verstärker auftritt und wenn eine große Rückreflexion von HF-Leistung von der Laserentladung auftritt. Es ist den Fachleuten auch bekannt, dass die Leistungssteuerung verwendet werden kann, um eine konstante Laserausgangsleistung beizubehalten, um eine Leistungsleitungsveränderung oder eine Degeneration eines HF-Bauteils in dem durch Fig. 9 zusammengefassten System zu kompensieren.

[0051] Es wird verstanden, dass die Eingangsimpedanz des Leistungsaddierers aus Fig. 7 durch jede Leistungsdifferenz beeinflusst wird, die zwischen den Eingangsanschlüssen auftreten kann. Die Eingangsimpedanz wird auch durch die Übertragungsleitungslänge beeinflusst, weil der Unterschied (unausgeglichene Leistung) von dem Ausgangsknoten zurück durch eine zusätzliche Leitungslänge phasenverschoben wird, um an den Eingängen aufzutreten. Die Länge der Leitung kann gewählt werden, um die Veränderung sowohl bei der Phase als auch bei dem Betrag zu minimieren oder um einen Betriebspunkt festzulegen wo keines von beiden den Maximalwert erreicht.

[0052] Solche Veränderungen werden als eine Funktion der Übertragungsleitungslängen in Fig. 10 und Fig. 11 gezeigt. Fig. 10 und Fig. 11 stellen Resultate einer Computersimulation des 5-Weg Leistungsaddierers aus Fig. 7 dar. Die graphische Darstellung zeigt Daten von einem Addierer, der bei 100 MHz arbeitet und vier der Eingänge in jeder von vier Übertragungsleitungen bei 1 kW und einen Eingang bei 650 W in der fünften Übertragungsleitung aufweist. Fig. 10 zeigt die Veränderung der Größe der Leistungsverstärker-Lastimpedanz wenn die Leitungslänge (in Metern) geändert wird. Die komplette Spitze-zu-Spitze (peak-to-peak) Größenveränderung bei Impedanzen für Anschlüsse **1**–**4** (d. h. die durchgezogene Linienkurve) ist 7 Ohm verglichen mit 38 Ohm für Anschluss **5** (d. h. die gestrichelte Linienkurve). In diesem Beispiel wird der Anschluss **5** bei wesentlich geringerer Leistung (d. h. 650 W) als Anschlüsse **1**–**4** (d. h. jeder bei 1 kW) betrieben und die Unausgewogenheit verändert die effektive Impedanz, die durch jeden Anschluss erfahren wird. Diese Veränderung in der Eingangsimpedanz, die durch die vier Anschlüsse erfahren wird, wenn eine Leistungsreduktion von 35% bei dem fünften Anschluss auftritt, deutet an, dass der Leistungsaddierer aus Fig. 7 solche Unausgewogenheiten ohne Schaden gut tolerieren kann.

[0053] Fig. 11 zeigt die Veränderung beim Phasenwinkel, der durch die Anschlüsse unter den selben Gegebenheiten wie für Fig. 10 erfahren wird. In dieser graphischen Darstellung ist (+) und (–) 180 Grad der gleiche Phasenwinkel. Die vollständige Spitze-zu-Spitze (peak to peak) Phasenveränderung für die Anschlüsse **1**–**4** ist 8 Grad (d. h. die dunkle Kurve) verglichen mit den 24 Grad für Anschluss **5** (d. h. die helle Kurve). Die durch Fig. 11 dargestellte Analyse zeigt, dass eine minimale Phasendifferenz bei ¼ Wellenlänge (0,49 Meter bei 100 MHz) und bei ¾ Wellenlänge (ungefähr 1,5 Meter Übertragungsleitungslänge bei 100 MHz) auftritt. Die maximale Phasendifferenz tritt bei einer ½ Wellenlänge auf. Wieder zeigt solch eine geringe Phasendifferenz, die durch die vier Anschlüsse erfahren wird, wenn eine 35% Reduktion der Ausgangsleistung bei dem fünften Anschluss auftritt, dass der Leistungsaddierer aus Fig. 7 solche Unausgewogenheiten ohne Schaden tolerieren wird.

[0054] Ähnliche Ergebnisse wir für Fig. 10 und Fig. 11 werden erhalten, wenn angenommen wird, dass der Anschluss **1** 245 Volt bei 1200 W ausgibt, wobei Anschlüsse **2**, **4** und **5** 234 Volt bei 1100 W ausgeben und Anschluss **3** 223 Volt bei 1000 W ausgibt. Eingangsspannungs- und -stromveränderungen als eine Funktion der Übertragungsleitungslängen werden berechnet. Die Analyse deutete wieder an, dass die Veränderungen bei Phase, Impedanz, Spannung und Strom, die unter den genannten Bedingungen berechnet werden, die durch die Leistungsverstärker ausgegeben werden, akzeptabel waren.

[0055] Die Leistungsverstärker, deren Ausgaben zu kombinieren sind, müssen realisiert sein, um die Impedanzveränderung hinzunehmen, ohne zusätzliches Fehlverhalten zu erzeugen. HF-Leistungsversorgungen, die verwendet werden, um CO_2-Laser zu betreiben, die in einem gepulsten Modus bei weniger als 100% Tastverhältnis arbeiten, weisen im Allgemeinen dieses Maß an Robustheit auf.

[0056] Die oben diskutierten Computersimulationen

zeigen, dass der Leistungsaddierer aus Fig. 7 ausreichend robust darin ist, Unausgewogenheiten zwischen Leistungsverstärkerausgaben zu tolerieren, dass er bei HF-Leistungsversorgungen, z. B. wie in **Fig.** 8 und Fig. 9 dargestellt, verwendet werden kann, um diffusionsgekühlte CO_2-Slablaser mittlerer Ausgangsleistung (d. h. einige Hundert bis 1000 W) zu betreiben, die wesentlich niedrigere Impedanzen als 50 Ohm aufweisen. Die in Fig. 5 und Fig. 6 dargestellten Leistungsaddierer weisen einen besseren Unausgewogenheitsschutz auf, aber solch ein Schutz bewirkt höhere Kosten als die Ausführungsform aus Fig. 7.

[0057] Der Leistungsaddierer aus Fig. 7 weist eine Isolation von –6 dB zwischen Transistorverstärkern auf, während der modifizierte Wilkinson Leistungsaddierer aus Fig. 6 um –20 dB bei seiner Mittenfrequenz liegt. Die Mittenfrequenz wird bestimmt durch die Länge der ¼ Wellenlängenübertragungsleitungen. Die Isolation zwischen Transistoren verringert sich rasch auf jeder Seite der Mittenfrequenz. Da der Leistungsaddierer aus Fig. 7 keine ¼ Wellenlängenleitungen benötigt, gibt es deshalb keine Mittenfrequenz, so dass die Isolation zwischen Transistoren über eine große Bandbreite konstant bleibt. Die –6 dB Isolation zwischen Transistoren ist klein im Vergleich mit den –20 dB des Wilkinson Addierers aus Fig. 6. In dem Fall von gepulsten Laserentladungs-Anwendungen hört der Laser auf zu funktionieren und muss gewartet werden, falls die HF-Leistung unter einen vorgegebenen Tiefpegel fällt. Dieser Tiefpegel wird ermittelt durch den Gasdruck, die Arbeitsleistung des Vorionisierers, die Trennung zwischen den Elektroden, Betriebstemperatur, Veränderungen in der Gasmischung, etc. Sobald dieser Tiefpegel erreicht ist, wird es schwierig die Entladung wieder auszulösen, so dass es keine andere Wahl gibt, als die Laserleistungsversorgung zu reparieren. Die in Fig. 10 und Fig. 11 gezeigte Analyse deutet an, dass es in dem Addierer aus Fig. 7 ausreichend weiche Degenration gibt, um das Bedürfnis zu befriedigen, dass das Betreiben von Laserentladungen erfordert.

[0058] Es ist wichtig wiederum zu bemerken, dass die in Fig. 5, Fig. 6 und Fig. 7 gezeigten Erfindungen nicht auf Impedanzen von weniger als 50 Ohm Eingänge beschränkt sind. Leistungsverstärker können hergestellt werden mit vielen nützlichen Ausgangsimpedanzen und es gibt viele Differenzimpedanzen für Koaxialkabel und Transformatoren, um Leistungsverstärkerimpedanzen anzupassen. PC-Untersysteme könnten ausgestaltet werden, um einen Vorteil aus dem Addierer aus Fig. 7 als auch aus dem veränderten binären (Fig. 5) und dem Wilkinson (Fig. 6) Addierer zu ziehen, um Impedanzen von wenigen Ohm bis zu wenigen Hundert Ohm zu bewältigen, d. h. CO_2-Laser, die jeweils Ausgangsleistungen in dem Kilowatt-Bereich bis zu einigen Zehn Watt Bereich aufweisen. Dieser Impedanzbereich kann durch zahlreiche Mittel passend gemacht werden, wie beispielsweise die Veränderung der Anzahl von Anschlüssen, die Veränderung des Wellenwiderstands der Übertragungsleitungen, die Veränderung der Aufwärts-/Abwärtstransformatorverhältnisse, etc. Die Erhältlichkeit von Koaxialkabelimpedanzen (für Fig. 6 und Fig. 7) und Transformatorverhältnissen (für Fig. 5) würde die Impedanzbereichsgrenze festlegen über welcher der Addierer verwendet werden kann. Die allgemeinen Prinzipien des Addierers aus Fig. 7 können in Systemen verwendet werden, die von wenigen Hertz bis in die Mikrowellengrenze (d. h. GHz) arbeiten. Der nächstbreitbandigste Addierer ist die Ausführungsform aus Fig. 5. Der schmalbandigste Addierer ist die Ausführung aus Fig. 6.

[0059] Es sollte erkannt werden, dass eine Vielzahl von Veränderungen der oben genannten Ausführungsformen dem Fachmann angesichts der vorstehenden Beschreibung offensichtlich sein werden. Demgemäß ist die Erfindung nicht auf diese spezifischen Ausführungsformen und Verfahren der vorliegenden Erfindung, die hierin gezeigt und beschrieben werden, beschränkt. Vielmehr wird der Schutzbereich der Erfindung durch die folgenden Ansprüche und deren Äquivalente bestimmt.

Zusammenfassung

[0060] Eine Ausführungsform eines vier-Weg binären Leistungsaddierers besteht aus einem ersten 1:1 Transformator, der eine von einem Ausgang eines ersten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz und eine von einem Ausgang eines zweiten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz kombiniert, um eine erste 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz an einem ersten Transformatorausgang bereitzustellen. Ein erster 100 Ohm Differenzwiderstand ist zwischen den ersten Leistungsverstärkerausgang und den zweiten Verstärkerausgang geschaltet. Der zweite 1:1 Transformator kombiniert eine von einem Ausgang eines dritten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz und eine von einem Ausgang eines vierten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz, um eine zweite 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz an einem zweiten Transformatorausgang bereitzustellen. Ein zweiter 100 Ohm Differenzwiderstand ist zwischen den dritten Leistungsverstärkerausgang und den vierten Leistungsverstärkerausgang geschaltet. Ein 50 Ohm Differenzwiderstand ist zwischen den ersten Transformatorausgang und den zweiten Transformatorausgang geschaltet. Ein dritter Transformator kombiniert die erste 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz und die zweite 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz, um eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz an einem dritten Transformatorausgang bereitzustellen, der für eine direkte Verbindung mit einer Last angepasst ist. Eine zweite Ausführungsform stellt einen

veränderten vier-Weg Wilkinson Leistungsaddierer bereit, der besteht aus vier Viertelwellenlängen-Koaxialübertragungsleitungen von gleicher Länge und von gleicher Impedanzcharakteristik. Das Eingangsende des Innenleiters von jeder Koaxialübertragungsleitung ist angepasst, um eine 50 Ohm Ausgangsimpedanz von einem Ausgang eines zugehörigen Leistungsverstärkers zu empfangen. Das Ausgangsende des Innenleiters von jeder Koaxialübertragungsleitung ist mit einem gemeinsamen Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden, das dadurch eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz empfängt. Der Außenleiter von jeder Koaxialübertragungsleitung ist mit Erde verbunden. Für jede Koaxialübertragungsleitung ist ein 50 Ohm Differenzwiderstand zwischen den Innenleiter dieser Übertragungsleitung und einen gemeinsamen Differenzwiderstands-Verbindungspunkt geschaltet. Der gemeinsame Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt ist zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst. Eine dritte bevorzugte Ausführungsform stellt einen Leistungsaddierer bereit, der aus einer Vielzahl von Koaxialübertragungsleitungen von gleicher Länge und mit gleichen Wellenwiderstand besteht. Das Eingangsende des Innenleiters von jeder der Koaxialübertragungsleitungen ist angepasst, um eine Leistungsverstärkerausgangsimpedanz von einem zugehörigen Leistungsverstärker zu empfangen. Das Ausgangsende des Innenleiters von jeder Koaxialübertragungsleitung ist mit einem gemeinsamen Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden, der eine Übertragungsleitungsausgangsimpedanz empfängt. Der Außenleiter von jeder Koaxialübertragungsleitung ist mit Erde verbunden. Die gemeinsame Übertragungsleitungsausgangsimpedanz ist für die direkte Verbindung mit einer Last angepasst.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- US 5434881 **[0009]**

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design, Kapitel 5; Samual V. Liao; Prentice Hall, Inc. Seiten 161–192 **[0013]**
- ”An N-Way Hybrid Power Divider” by Ernest J. Wilkinson; IRE Transactions an Microwave Theory and Techniques, Januar 1960, Seiten 311–313 **[0013]**
- Seiten 183–184 der Liao Veröffentlichung **[0013]**

Patentansprüche

1. Binäre Leistungsaddierer-Schaltung umfassend:
einen ersten Transformator, der eine von einem ersten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe und eine von einem zweiten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe kombiniert, um eine erste Transformatorausgabe bereitzustellen;
einen ersten Differenzwiderstand, der zwischen den Ausgang des ersten Leistungsverstärkers und den Ausgang des zweiten Leistungsverstärkers geschaltet ist;
ein zweiter Transformator, der eine von einem dritten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe und eine von einem vierten Leistungsverstärker empfangene Ausgabe kombiniert, um eine zweite Transformatorausgabe bereitzustellen;
einen zweiten Differenzwiderstand, der zwischen den Ausgang des dritten Leistungsverstärkers und den Ausgang des vierten Leistungsverstärkers geschaltet ist;
einen dritten Differenzwiderstand, der zwischen den ersten Transformatorausgang und den zweiten Transformatorausgang geschaltet ist; und
ein dritter Transformator, der verschaltet ist, um die erste Transformatorausgabe und die zweite Transformatorausgabe zu kombinieren, um eine dritte Transformatorausgabe direkt an einer Last bereitzustellen.

2. 4-Weg binärer Leistungsaddierer, bestehend aus:
einem ersten 1:1 Transformator, der eine von einem Ausgang eines ersten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz und eine von einem Ausgang eines zweiten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz kombiniert, um eine erste 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz an einem ersten Transformatorausgang bereitzustellen;
einem ersten 100 Ohm Differenzwiderstand, der zwischen den ersten Leistungsverstärkerausgang und den zweiten Leistungsverstärkerausgang geschaltet ist;
einem zweiten 1:1 Transformator, der eine von einem Ausgang eines dritten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz und eine von einem Ausgang eines vierten Leistungsverstärkers empfangene 50 Ohm Ausgangsimpedanz kombiniert, um eine zweite 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz an einem zweiten Transformatorausgang bereitzustellen;
einem zweiten 100 Ohm Differenzwiderstand, der zwischen den dritten Leistungsverstärkerausgang und den vierten Leistungsverstärkerausgang geschaltet ist;
einem 50 Ohm Differenzwiderstand, der zwischen den ersten Transformatorausgang und den zweiten Transformatorausgang geschaltet ist; und
einem dritten Transformator, der die erste 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz und die zweite 25 Ohm Transformatorausgangsimpedanz kombiniert, um eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz an einem dritten Transformatorausgang bereitzustellen, wobei der dritte Transformatorausgang zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst ist.

3. 4-Weg binärer Leistungsaddierer nach Anspruch 2, und wobei die Last ein Impedanzanpassungsnetzwerk umfasst, das eine Ausgabe an einem Laser bereitstellt.

4. Modifizierter Wilkinson Leistungsaddierer umfassend:
eine Vielzahl von Viertelwellenlängen-Übertragungsleitungen, die gleiche Länge und gleichen Wellenwiderstand aufweisen, wobei jede Übertragungsleitung ein Eingangsende aufweist, das verbunden ist, um eine Ausgangsimpedanz von einem Ausgang eines zugehörigen Leistungsverstärkers zu erhalten, wobei die Übertragungsleitung weiter ein Ausgangsende aufweist, das mit einem gemeinsamen Verbindungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden ist; und
für jede Übertragungsleitung, einen Differenzwiderstand, der zwischen das Eingangsende der Übertragungsleitung und einen gemeinsamen Differenzwiderstands-Verbindungspunkt geschaltet ist, und
wobei der Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst ist.

5. Modifizierter 4-Weg Wilkinson Leistungsaddierer bestehend aus:
einer ersten, einer zweiten, einer dritten und einer vierten Viertelwellenlängen-Koaxialübertragungsleitung, die gleiche Länge und einen 50 Ohm Wellenwiderstand aufweisen, wobei jede Koaxialübertragungsleitung einen Innenleiter mit einem Eingangsende und einem Ausgangsende und einen Außenleiter aufweist, wobei das Eingangsende des Innenleiters dazu angepasst ist, eine 50 Ohm Ausgangsimpedanz von einem Ausgang eines zugehörigen Leistungsverstärkers zu erhalten, wobei das Ausgangsende des Innenleiters mit einem gemeinsamen Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden ist, der eine 12,5 Ohm Ausgangsimpedanz erhält, wobei der Außenleiter mit Erde verbunden ist; und
für jede Koaxialübertragungsleitung, einem 50 Ohm Differenzwiderstand, der zwischen den Innenleiter der Koaxialübertragungsleitung und einen gemeinsamen Differenzwiderstands-Verbindungspunkt geschaltet ist, und
wobei der gemeinsame Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst ist.

6. Modifizierter 4-Weg Wilkinson Leistungsaddierer nach Anspruch 5, und wobei die Last ein Impe-

danzanpassungsnetzwerk umfasst, das eine Ausgangsimpedanz an einem Laser bereitstellt.

7. Leistungsaddierer umfassend:
eine Vielzahl von Übertragungsleitungen mit gleicher Länge und gleichem Wellenwiderstand, wobei jede Übertragungsleitung ein Eingangsende, das dazu angepasst ist, eine Leistungsverstärkerausgangsimpedanz von einem zugehörigen Leistungsverstärker zu erhalten, und ein Ausgangsende aufweist, das mit einem gemeinsamen Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden ist, der eine Übertragungsleitungsausgangsimpedanz erhält, und
wobei der Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst ist.

8. Leistungsaddierer bestehend aus:
einer Vielzahl von Koaxialübertragungsleitungen mit gleicher Länge und gleichem Wellenwiderstand, wobei jede Koaxialübertragungsleitung einen Innenleiter aufweist mit einem Eingangsende, das dazu angepasst ist, eine Leistungsverstärkerausgangsimpedanz von einem zugehörigen Leistungsverstärker zu erhalten, und mit einem Ausgangsende, das mit einem gemeinsamen Übertragungsleitungsausgangs-Verbindungspunkt verbunden ist, der eine Übertragungsleitungsausgangsimpedanz erhält, wobei jede Koaxialübertragungsleitung einen Außenleiter aufweist, der mit Erde verbunden ist, und
wobei die gemeinsame Übertragungsleitungsausgangsimpedanz zur direkten Verbindung mit einer Last angepasst ist.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

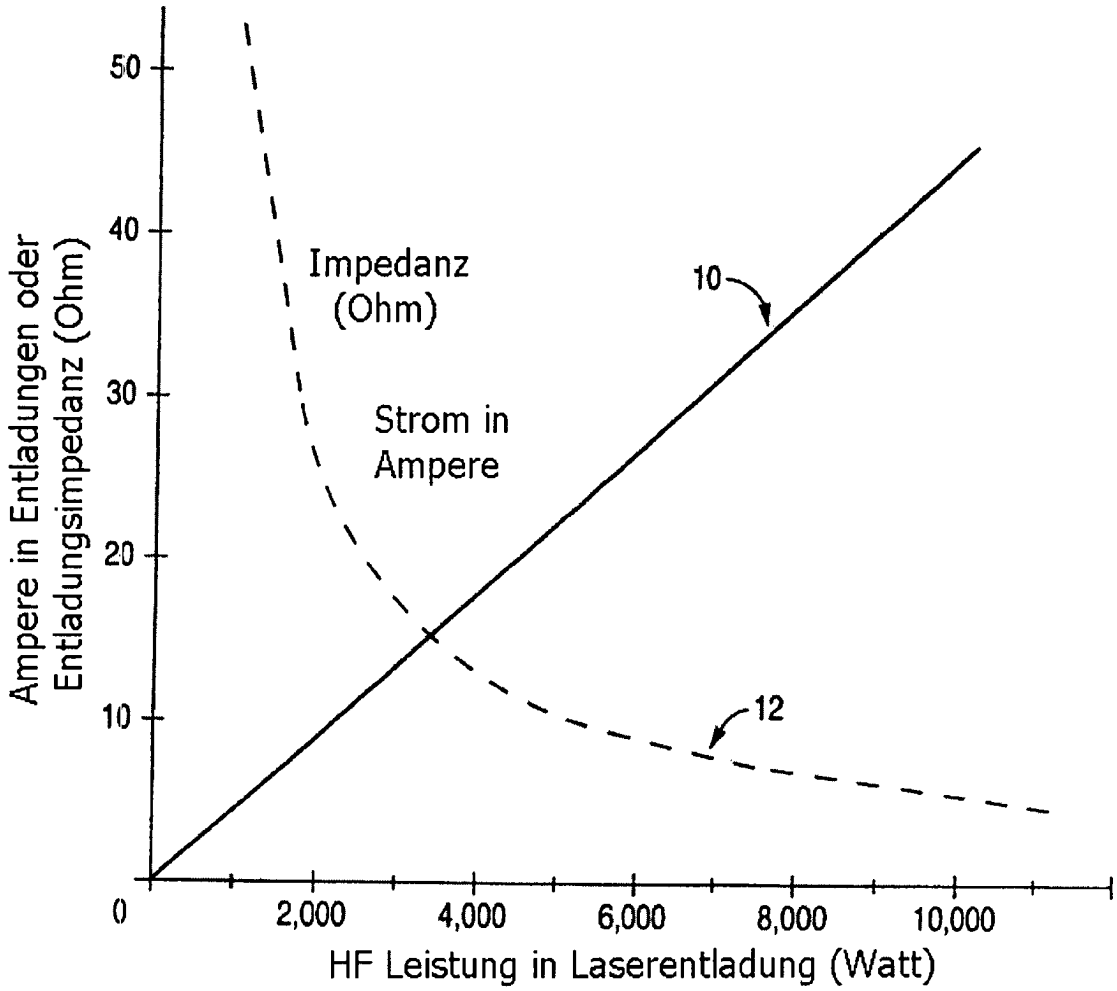


FIG. 1

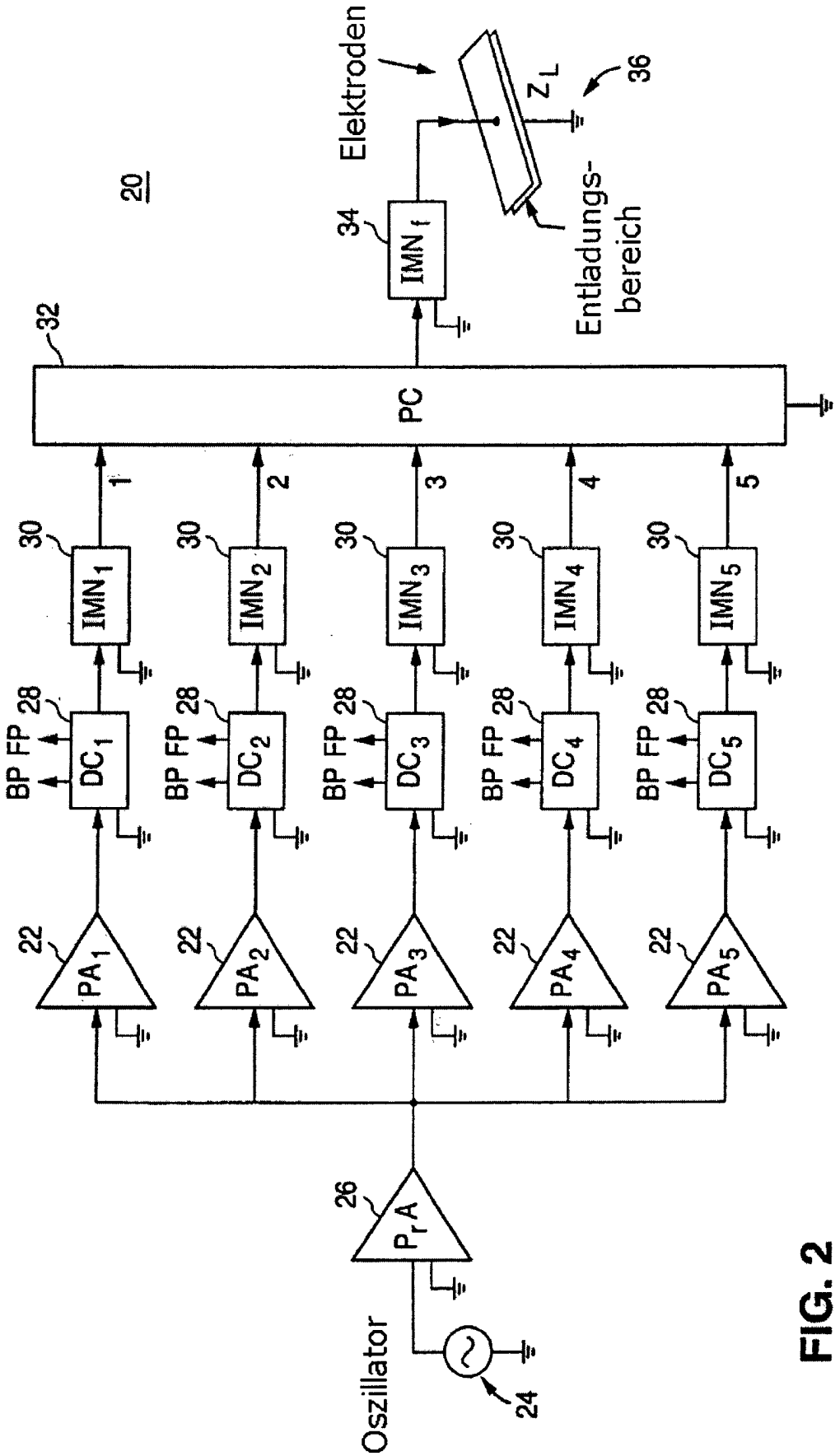


FIG. 2
(Stand der Technik)

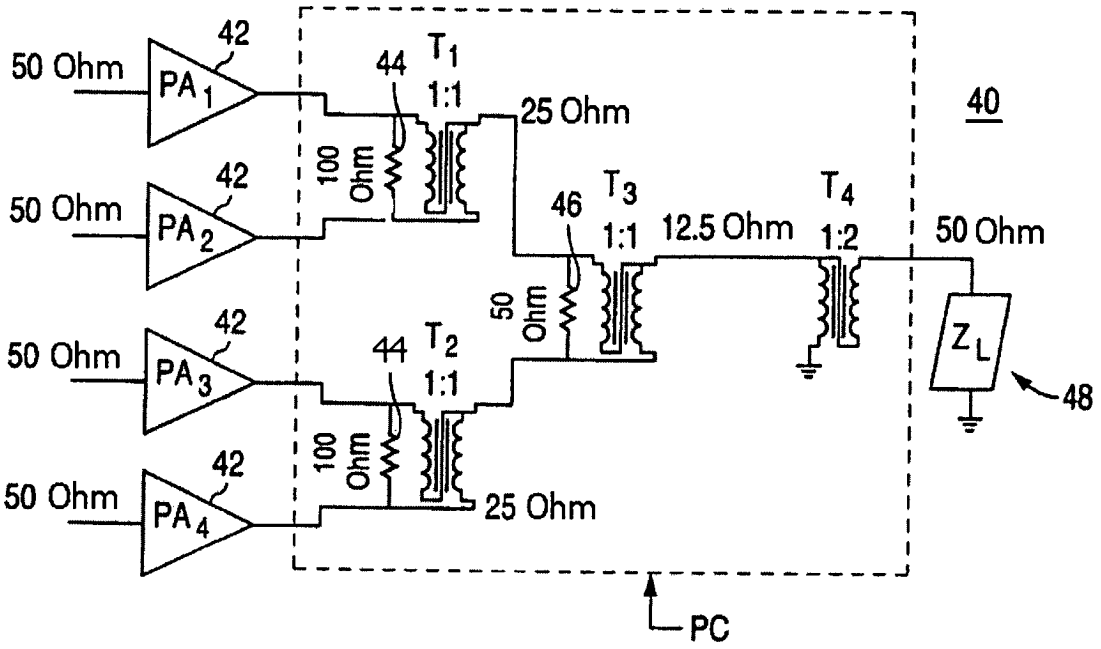


FIG. 3
(Stand der Technik)

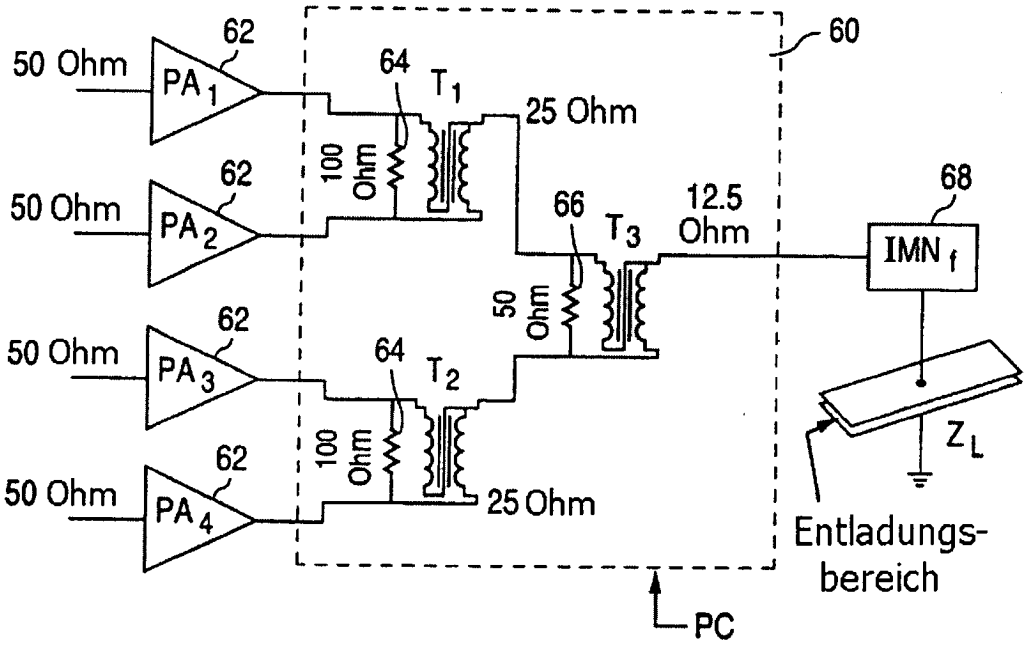


FIG. 5

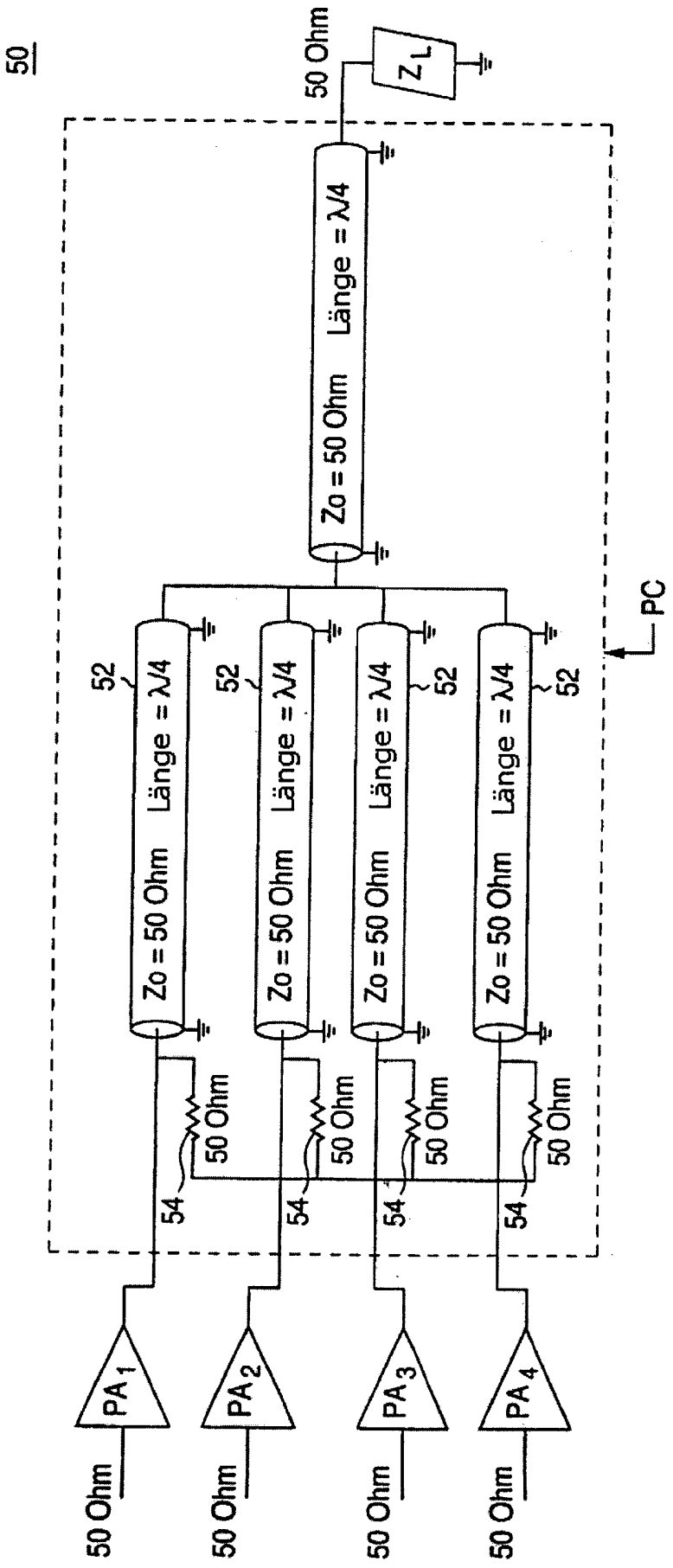


FIG. 4
(Stand der Technik)

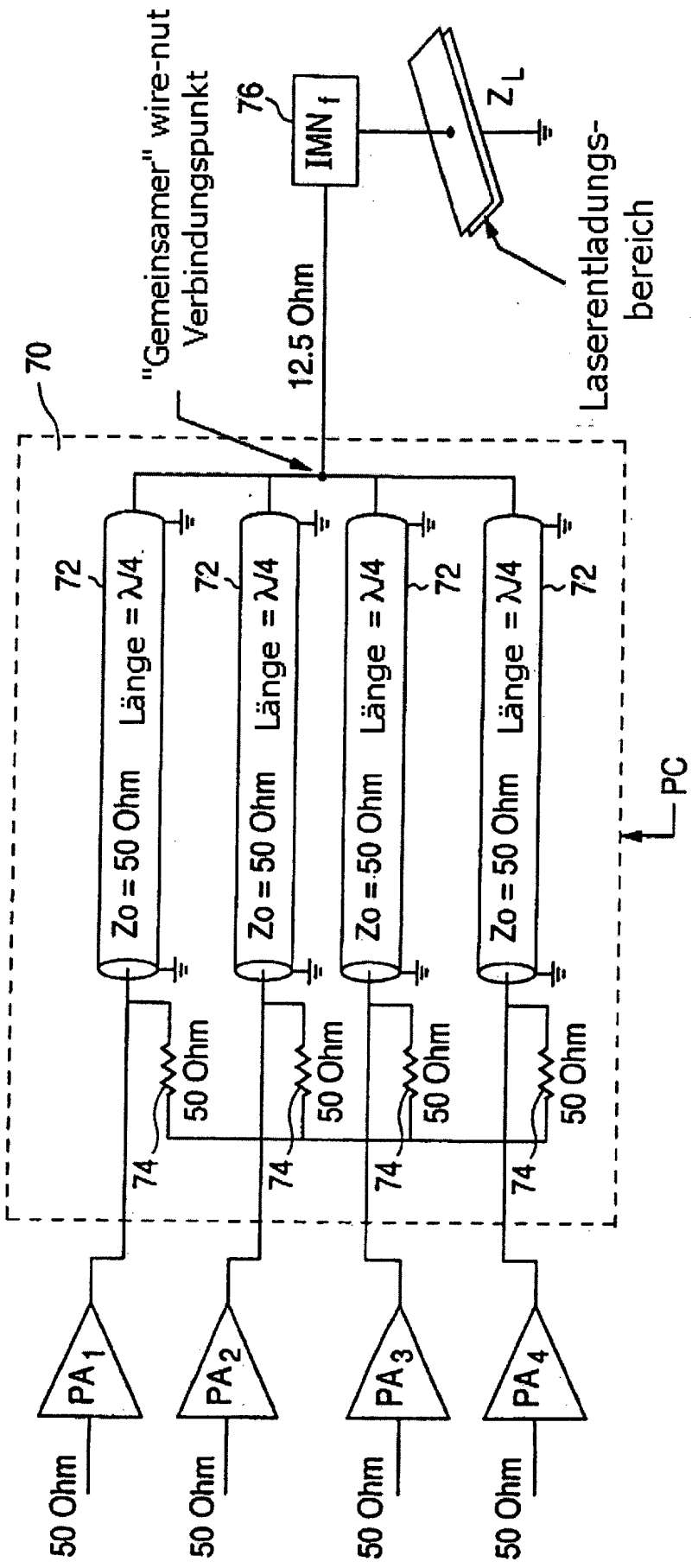

70
"Gemeinsamer" wire-nut Verbindungspunkt
76
IMN f
12.5 Ohm
Z L
Laserentladungs-bereich
72
Länge = λ/4
Zo = 50 Ohm
50 Ohm
74
PC
PA 1
PA 2
PA 3
PA 4
50 Ohm

FIG. 6

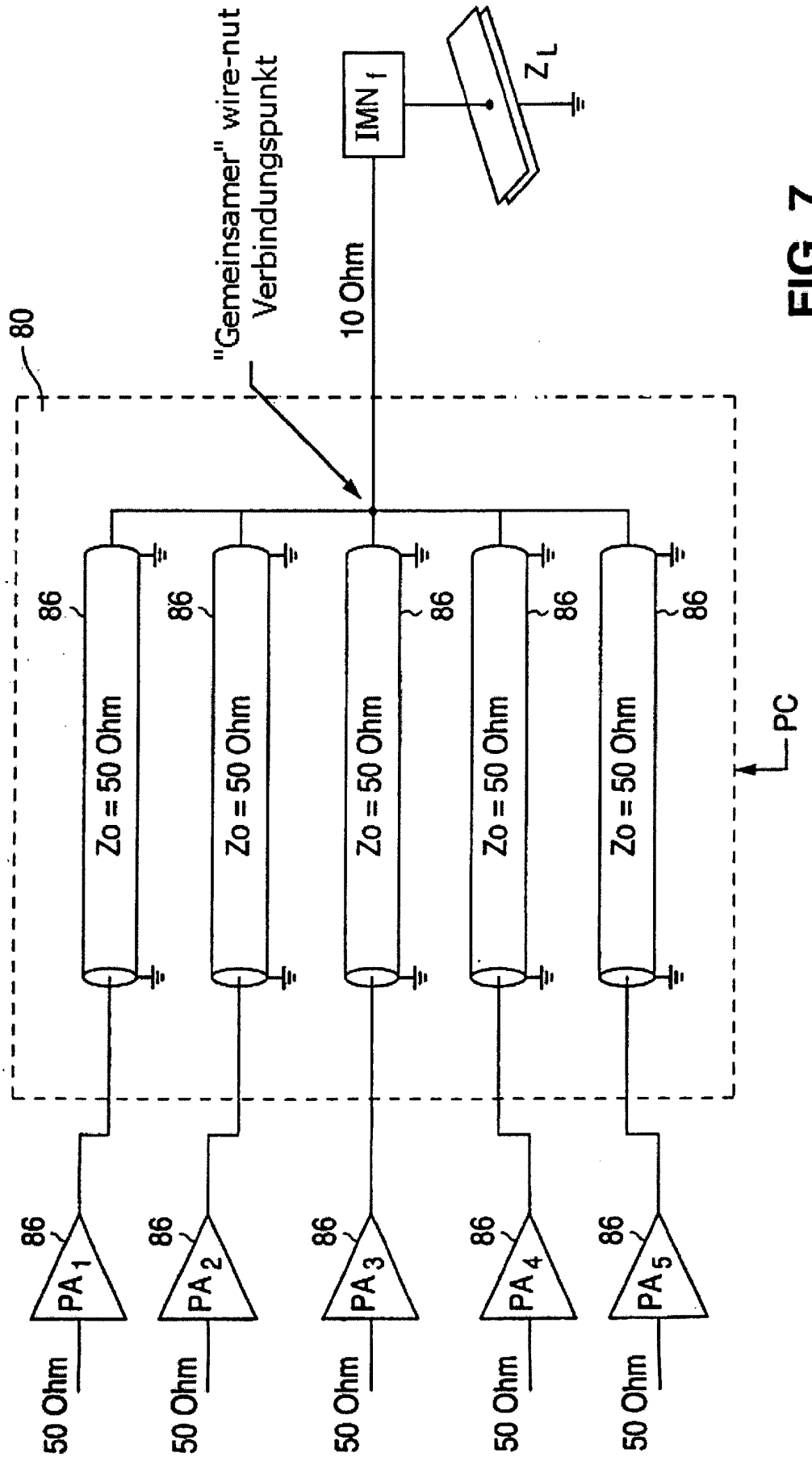

80
"Gemeinsamer" wire-nut Verbindungspunkt
10 Ohm
IMN f
Z L
86
Zo = 50 Ohm
PC
PA 1
PA 2
PA 3
PA 4
PA 5
50 Ohm

FIG. 7

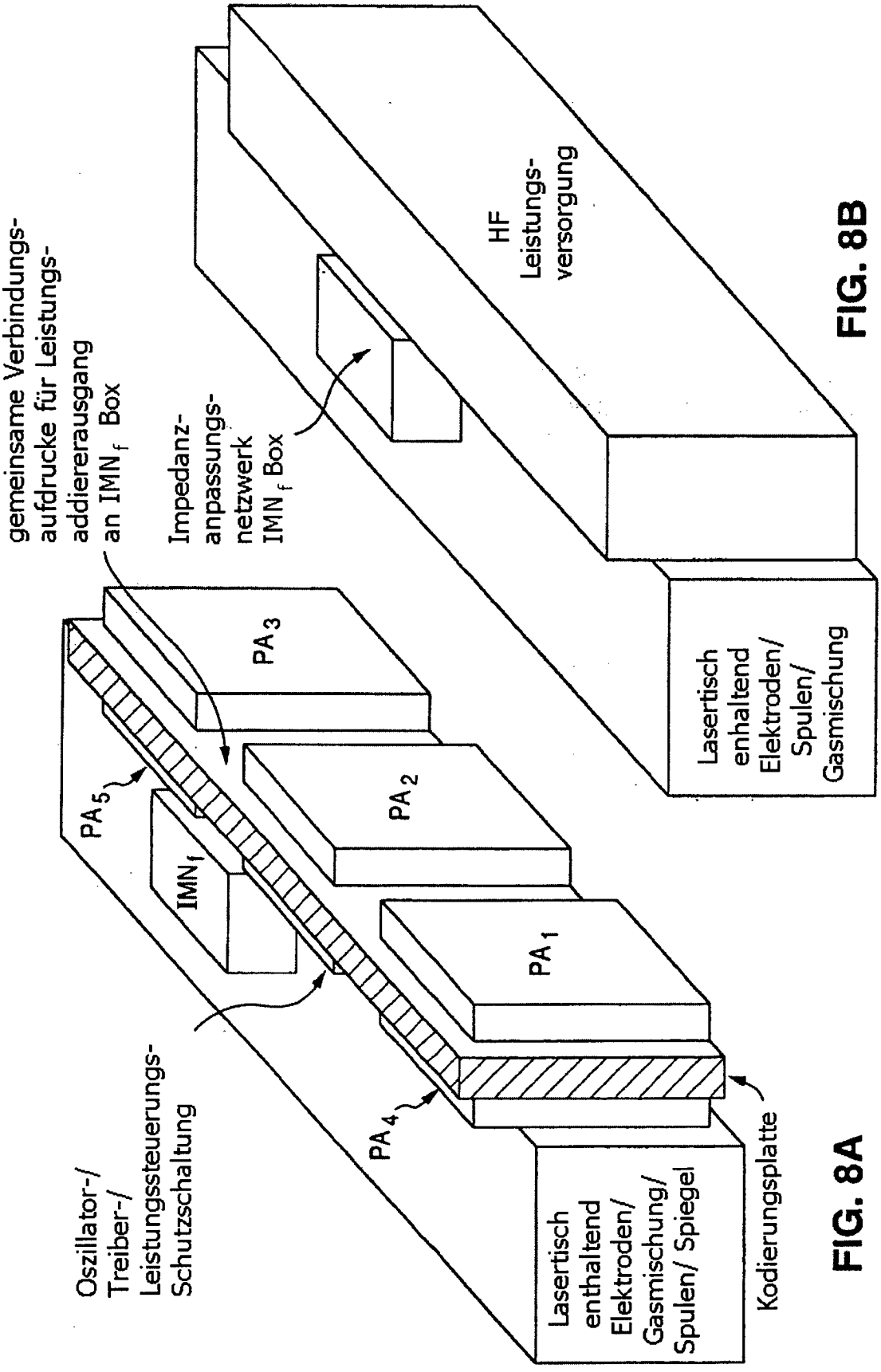

gemeinsame Verbindungs-
aufdrucke für Leistungs-
addiererausgang
an IMN$_f$ Box
Impedanz-
anpassungs-
netzwerk
IMN$_f$ Box
HF
Leistungs-
versorgung
PA$_3$
PA$_2$
PA$_1$
PA$_5$
IMN$_f$
PA$_4$
Oszillator-/
Treiber-/
Leistungssteuerungs-
Schutzschaltung
Lasertisch
enthaltend
Elektroden/
Gasmischung/
Spulen/ Spiegel
Kodierungsplatte
Lasertisch
enthaltend
Elektroden/
Spulen/
Gasmischung

FIG. 8A

FIG. 8B

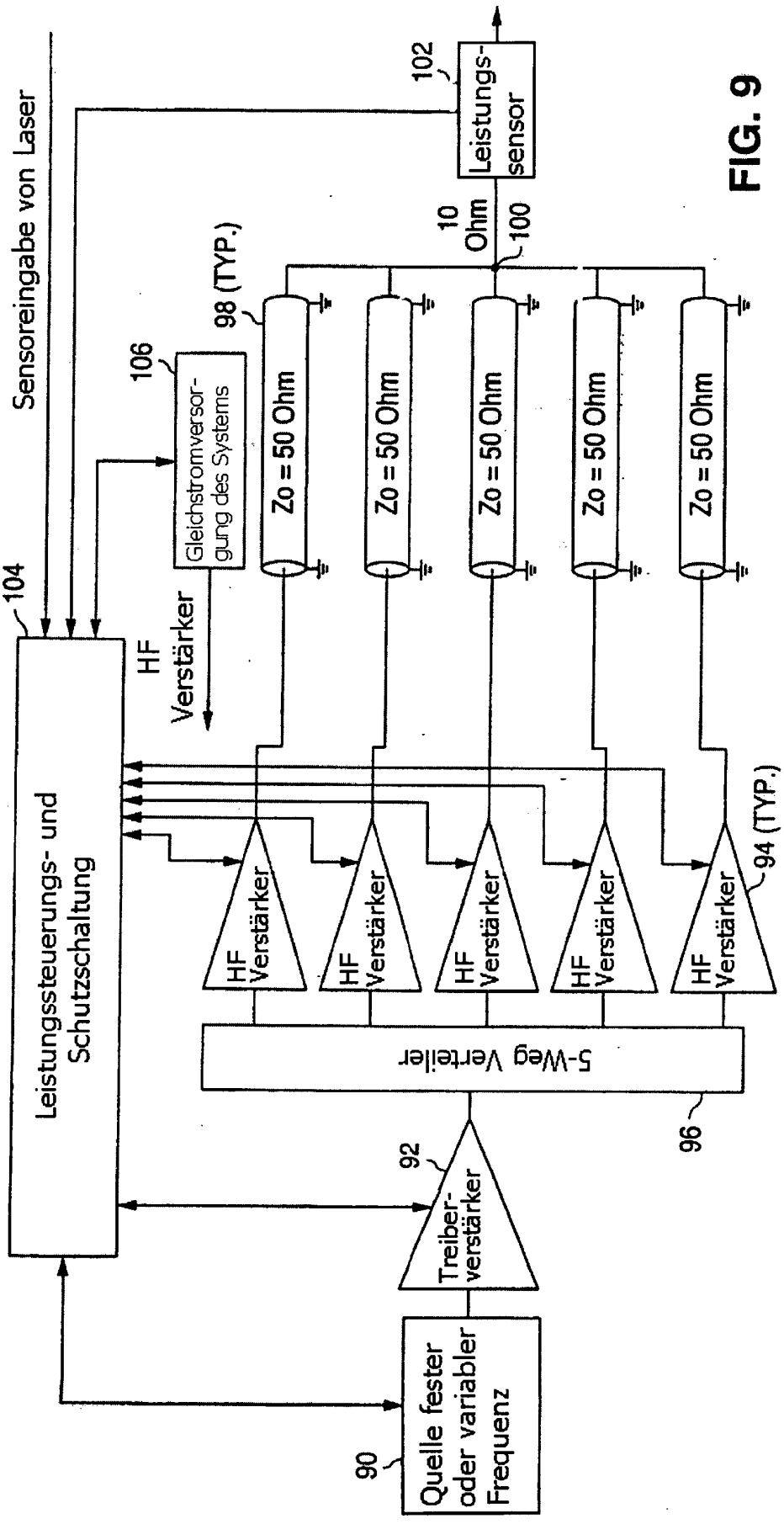

Sensoreingabe von Laser
102
Leistungs-sensor
10 Ohm
100
98 (TYP.)
106
Gleichstromversor-gung des Systems
Zo = 50 Ohm
Zo = 50 Ohm
Zo = 50 Ohm
Zo = 50 Ohm
Zo = 50 Ohm
104
HF Verstärker
Leistungssteuerungs- und Schutzschaltung
HF Verstärker
HF Verstärker
HF Verstärker
HF Verstärker
HF Verstärker
94 (TYP.)
5-Weg Verteiler
96
92
Treiber-verstärker
Quelle fester oder variabler Frequenz
90

FIG. 9

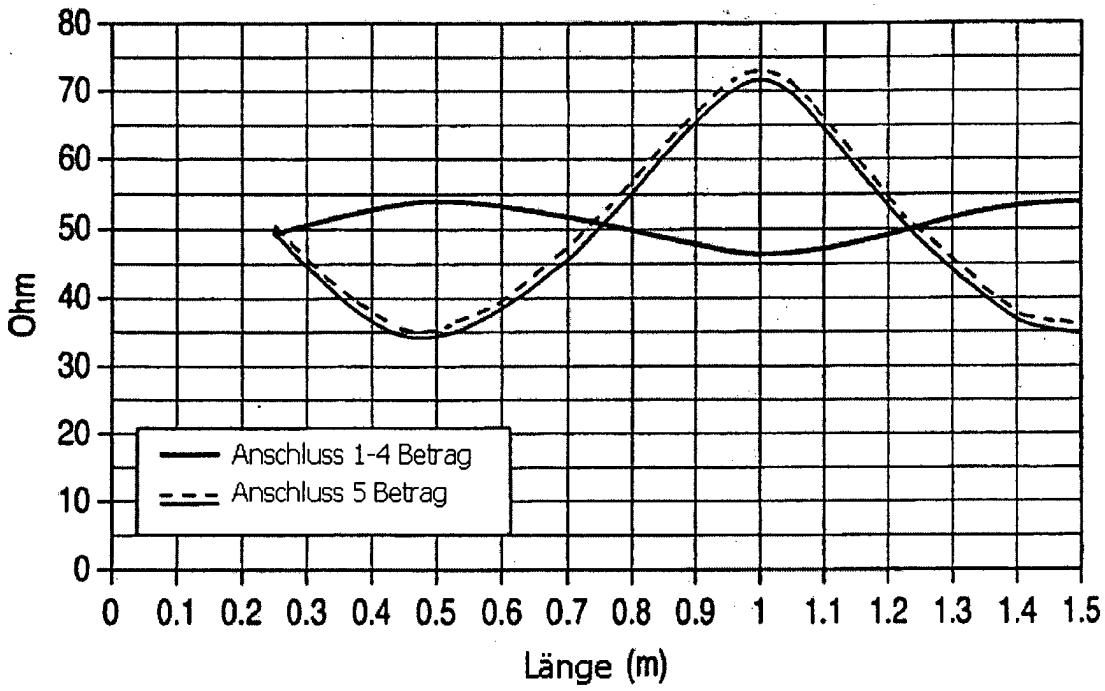

80
70
60
50
40
30
20
10
0
Ohm
Anschluss 1-4 Betrag
Anschluss 5 Betrag
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5
Länge (m)

FIG. 10

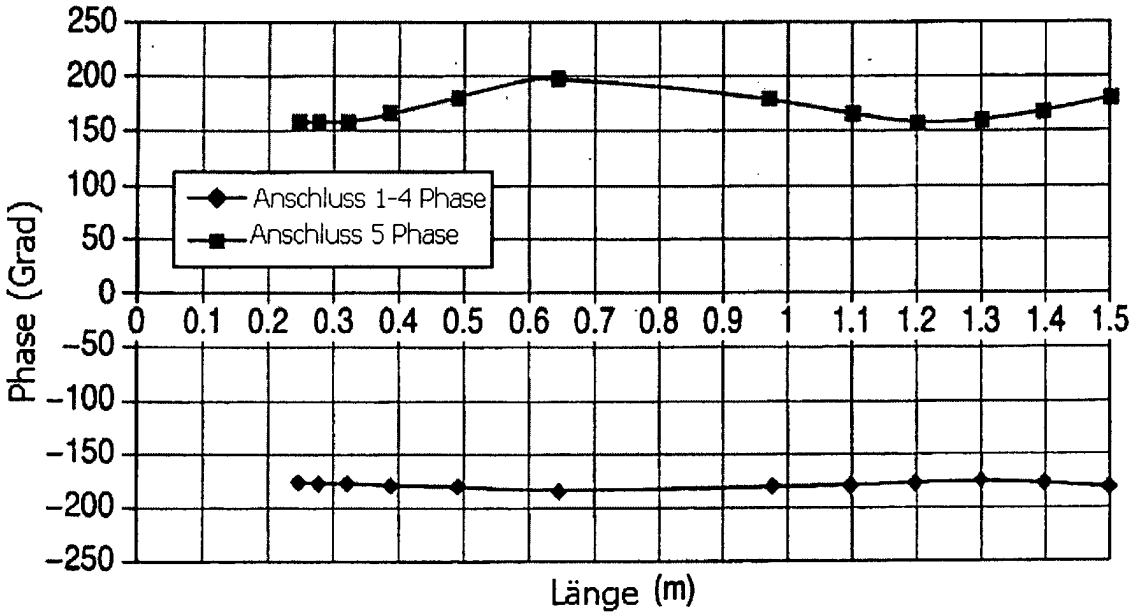

250
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
Phase (Grad)
Anschluss 1-4 Phase
Anschluss 5 Phase
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5
Länge (m)

FIG. 11