



(11) **EP 1 763 285 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
14.03.2007 Patentblatt 2007/11

(51) Int Cl.:
H05B 6/04^(2006.01) C21D 1/42^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06019197.0**

(22) Anmeldetag: **13.09.2006**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(72) Erfinder:
• **Andrä, Frank**
73669 Lichtenwald (DE)
• **Smirek, Joachim**
70619 Stuttgart (DE)

(30) Priorität: **13.09.2005 DE 102005043611**

(74) Vertreter: **Schmidt, Steffen J.**
Wuesthoff & Wuesthoff,
Patent- und Rechtsanwälte,
Schweigerstrasse 2
81541 München (DE)

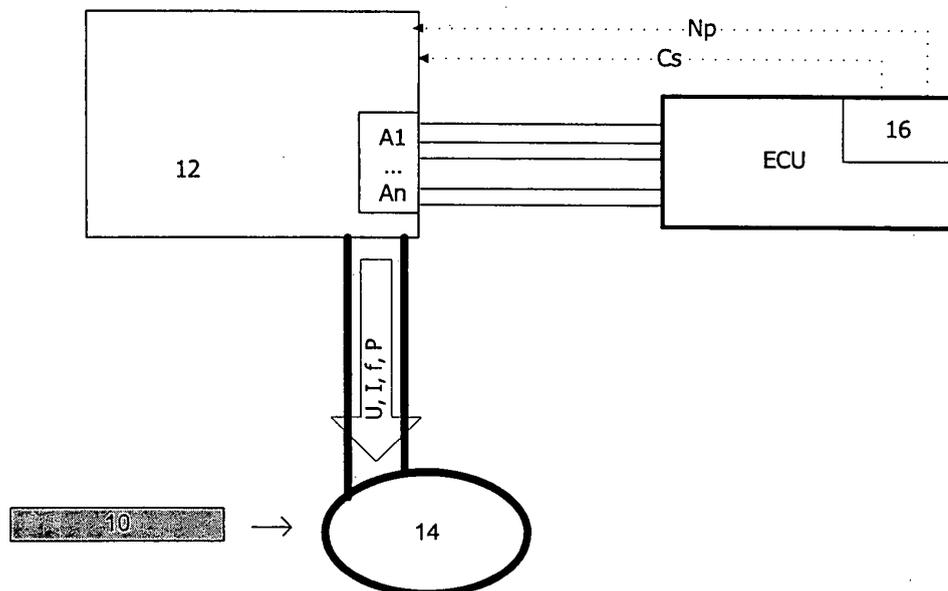
(71) Anmelder: **HWG Inductoheat GmbH**
73262 Reichenbach/Fils (DE)

(54) **Induktionshärtungsanlage**

(57) Eine Induktionshärtungsanlage zur Wärmebehandlung von elektrisch leitenden Werkstücken, mit einem, hinsichtlich wenigstens einigen seiner Betriebsparameter durch Veränderung variabler Komponenten steuerbaren Wechselstromumrichter, wenigstens einer mit dem Wechselstromumrichter elektrisch zu verbindenden Härte-Induktionsspule, die eine an die Gestalt wenigstens einer zu behandelnden Stelle der Werkstücke angepasste Form hat, um das Werkstück zumindest an dieser Stelle in einem Härtungsvorgang mittels der Härte-Induktionsspule zu erwärmen, wenn der Wechselstromumrichter die Härte-Induktionsspule mit elektrischer Leistung beschickt und das Werkstück der Härte-Induktionsspule zugeführt ist, Messeinrichtungen, die wenigstens einige der Betriebsparameter des Wechselstromumrichters erfassen, wobei die Induktionshärtungsanlage dazu eingerichtet ist, sie mit einer elektronischen Rechneinheit zu verbinden, die in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten erzeugt und an einer Ausgabeeinrichtung ausgibt, um die Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichters im Sinne einer Optimierung der Leistungsaufnahme der Härte-Induktionsspule zu beeinflussen.

schers Leistung beschickt und das Werkstück der Härte-Induktionsspule zugeführt ist, Messeinrichtungen, die wenigstens einige der Betriebsparameter des Wechselstromumrichters erfassen, wobei die Induktionshärtungsanlage dazu eingerichtet ist, sie mit einer elektronischen Rechneinheit zu verbinden, die in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten erzeugt und an einer Ausgabeeinrichtung ausgibt, um die Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichters im Sinne einer Optimierung der Leistungsaufnahme der Härte-Induktionsspule zu beeinflussen.

Fig. 2



EP 1 763 285 A1

BeschreibungHintergrund der Erfindung

5 **[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft eine elektrisch zu betreibende Induktionshärtungsanlage. Die Anwendungsbereiche derartiger Anlagen sind weitgestreut von Härteanwendungen über Schweiß- und Sinterprozessen bis hin zu speziellen Einsätzen wie die Erwärmung von Materialien im Vakuum oder unter Schutzgas, welche mit der herkömmlichen Gaserwärmung nicht zu realisieren wären. Die Induktionshärtung ist ein bewährtes Verfahren zur Qualitätssteigerung von Präzisionsteilen aus Stahl, Stahlguss, oder Gusseisen. Dabei wird das zu härtende Werkstück in sehr kurzer Zeit (ggf. Bruchteilen von Sekunden) auf Rotglut gebracht und anschließend sofort wieder abgeschreckt. Als Abschreckmittel werden Wasser, Luft, Öl oder Emulsionen eingesetzt. Bei der Härtung spielt der Kohlenstoffgehalt im Eisen eine wichtige Rolle. Für einen nennenswerten Härte sollte der Kohlenstoffanteil mindestens 0,35 % betragen.

10 **[0002]** Vor allem kompliziert geformte metallische Werkstücke werden lediglich in bestimmten Bereichen durch Induktion auf erforderliche Härtetemperatur gebracht und anschließend abgeschreckt. So entsteht in diesem Bereich, z.B. auf der Laufbahn von Kurvenscheiben, ein harter, verschleißfester Stahl. Das Induktionshärten wird insbesondere automatisiert, das heißt mit Handhabungseinrichtungen zum Be- und Entladen in der Großserienproduktion zum Beispiel zum Härten von Zahnrädern, Nocken- und Kurbelwellen eingesetzt. Die Induktionserwärmung wird auch eingesetzt, um lokale Bereiche eines gehärteten Werkstückes wieder anzulassen.

15 **[0003]** Bei der induktiven Erwärmung entsteht die Wärme im Werkstück selbst. Grundsätzlich lassen sich mit der induktiven Erwärmung alle elektrisch leitenden Stoffe erwärmen. In der Praxis werden hauptsächlich Metalle und Legierungen aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit induktiv erwärmt.

20 **[0004]** Ein Induktor baut ein magnetisches Wechselfeld auf, wenn er von Wechselstrom durchflossen wird. Das zu bearbeitende Werkstück bildet eine kurzgeschlossene Spule. Wenn durch den Induktor ein Wechselstrom fließt, wird in dem Werkstück eine Spannung induziert, welche im Werkstück induzierte Wirbelströme zur Folge hat. Dieser Strom führt zu einer Erwärmung des Materials des Werkstücks. Die Wärme gelangt hier nicht von der Oberfläche her in das Werkstück, sondern sie entsteht in der zu härtenden Schicht. Beim Erwärmen auf Härtetemperatur wechselt die Struktur des Eisengitters von kubisch-raumzentriert zu kubisch-flächenzentriert. Die Kohlenstoffatome diffundieren ins Metallgitter. Durch sehr schnelles Abkühlen (Abschrecken) klappt das Metallgitter wieder zurück, ohne dass die Kohlenstoffatome ihre Position wechseln können. Die Kohlenstoffatome werden im Metallgitter festgehalten. Die dadurch erzielte Verzerrung des Raumgitters macht sich makroskopisch als Härtesteigerung des Materials bemerkbar. Durch diese Gefügeumwandlung lassen sich Härte, Sprödigkeit, Zähigkeit, innere Spannungen u.ä. beeinflussen. Der vorstehende Sachverhalt ist zur besseren Anschaulichkeit in Fig. 1a veranschaulicht.

25 **[0005]** Die Stromeindringtiefe und damit die Härtetiefe ist abhängig von der Betriebsfrequenz der Induktionsanlage. Sie nimmt mit zunehmender Frequenz aufgrund des sog. Skin-Effektes ab. Je nach erforderlicher Härtetiefe bzw. Stromeindringtiefe wird die Betriebsfrequenz der Induktionsanlage festgelegt. Der Bereich der anwendbaren Frequenzen wird in Niederfrequenz (50 Hz - 500 Hz), Mittelfrequenz (500 Hz - 50 kHz) und Hochfrequenz (50 kHz - 30 MHz) unterteilt. Damit sind Eindringtiefen zwischen 8 mm im Niederfrequenzbereich und etwa bis 0,1 mm im Hochfrequenzbereich zu erzielen. Dieser Sachverhalt ist zur besseren Anschaulichkeit in Fig. 1b veranschaulicht. Nicht bei Netzfrequenz arbeitende Induktionsanlagen müssen diese Frequenzen mittels Frequenzwandlern aus der Netzfrequenz erzeugen. Dazu stehen folgende Geräte zur Verfügung: Frequenzvervielfacher (statischer Frequenz-Umformer), Thyristor-Umrichter und Transistor-Umrichter, HF-Transistor-Umrichter und (Röhren-)Hochfrequenzgenerator.

30 **[0006]** Kernstück jeder Induktionserwärmungsanlage bildet der Frequenzwandler oder Umrichter. Der Umrichter versorgt den Induktor mit der aus der Netzfrequenz umgewandelten Nieder-, Mittel- bzw. Hochfrequenz-Leistung. Der Induktor erwärmt hiermit die in ihn eingebrachten Werkstücke. Halbleiter-Umrichter (Transistor-/ Thyristorumrichter) zeichnen sich durch folgende Vorzüge aus: Durch den Einsatz von Halbleiterschaltern entfallen die Probleme der Korrosion in den internen Kühlkreisen. Ein Serien-Schwingkreis-Umrichter kann relativ einfach und kostengünstig aufgebaut sein. Die Startbedingungen eines Serien-Schwingkreis-Umrichters sind auch bei schwierigen Anpass-Situationen (des Induktors an den Umrichter) relativ unkritisch. Sein Wirkungsgrad kann auch im Teillastbereich ein relativ hohes Niveau erreichen.

35 **[0007]** Wesentliche Vorteile der induktiven Erwärmung von Werkstücken sind der hohe Wirkungsgrad, die hohe Wiederholgenauigkeit, die Möglichkeit der punktuellen Erwärmung ohne Peripherie zu erwärmen, flexible Anpassungsmöglichkeiten der Anlage an verschiedenste Werkstücke. Außerdem ist eine schnelle Erwärmung und ein hoher Durchsatz der Werkstücke realisierbar.

40 **[0008]** Weitere Vorteile sind die gleichmäßige Aufheizung der zu härtenden Stellen sowie die kurzen Erwärmungszeiten und infolgedessen geringe Zunderbildung an den Werkstücken. In vielen Fällen ist keine Nacharbeit erforderlich. Durch die kurzzeitige Erwärmung wird Grobkornbildung durch Überzeiten oder Überhitzen vermieden. Die Wärmezufuhr ist sicher zu beherrschen. Die erforderlichen Temperaturen können einfach erreicht und eingehalten werden. Der Verzug der behandelten Werkstücke ist im allgemeinen gering. Im Vergleich zur Einsatzhärtung können legierte Einsatzstähle

durch billige Vergütungsstähle ersetzt werden. Partielle Härtung ist meistens auch noch bei schwierigsten Werkstückformen möglich. Das Aufstellen der Härtemaschinen und Umrichter/Generatoren kann direkt in den Fertigungsstraßen erfolgen. Der Platzbedarf ist gering, die Bedienung im Serienbetrieb ist einfach, die Arbeitsweise ist sauber und nicht gesundheitsgefährdend.

5

Der Erfindung zugrundeliegendes Problem

10

15

[0009] Beim Einrichten einer Induktionshärtungsanlage für eine neue Härtungsaufgabe sind eine Reihe von Parametern zu beachten: Ein Umrichter, dessen Ausgangsleistung mittels Stelleinrichtungen an die neue Situation anzupassen ist, ein spezifisch geformtes Werkstück mit weitgehend unbekanntem Materialeigenschaften, ein dementsprechend geformter Induktor mit einem meist unbekanntem komplexen Widerstand ($R+j\omega L+1/j\omega C$), einem Betriebsstrom, mit dem der Induktor zu beschicken ist (insbesondere dessen Strom, Spannung, Frequenz und Leistung), die Verweildauer des Werkstückes im/beim Induktor bzw. die Fördergeschwindigkeit des Werkstückes relativ zum Induktor, sowie die Parameter der Induktorkühlung (Art des Kühlmediums, Temperatur, Volumenstrom, etc.) und der Werkstück-Abschreckbrause (Art des Abschreckmediums, Temperatur, Volumenstrom, etc.), um nur einige zu nennen. Deren Festlegung erfordert viel Erfahrung und detaillierte Kenntnisse des Härtungsprozesses und der eingesetzten Anlage. Diese Erfahrung und Kenntnisse sind oftmals bei den Bedienern der Induktionshärtungsanlage nicht im erforderlichen Maß vorhanden.

20

Aufgabe der Erfindung

[0010] Daher liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Induktionshärtungsanlage bereitzustellen, die es erlaubt auch ohne spezielle dies Kenntnisse eine Induktionshärtungsanlage für eine neue Härtungsaufgabe zumindest nahezu optimal einzurichten.

25

Erfindungsgemäße Lösung

[0011] Zur Behebung dieser Nachteile lehrt die Erfindung einen Induktionserwärmungsanlage, die durch die Merkmale des Anspruchs 1 definiert ist.

30

Aufbau, Weiterbildungen und Vorteile der erfindungsgemäßen Lösung

35

40

45

[0012] Eine Induktionserwärmungsanlage gemäß der vorliegenden Erfindung dient zur Wärmebehandlung von elektrisch leitenden Werkstücken und ist ausgestattet mit einem, hinsichtlich wenigstens einigen seiner Betriebsparameter durch Veränderung variabler Komponenten steuerbaren Wechselstromumrichter, wenigstens einer mit dem Wechselstromumrichter elektrisch zu verbindenden Härte-Induktionsspule, die eine an die Gestalt wenigstens einer zu behandelnden Stelle der Werkstücke angepasste Form hat, um das Werkstück zumindest an dieser Stelle in einem Härtungsvorgang mittels der Härte-Induktionsspule zu erwärmen, wenn der Wechselstromumrichter die Härte-Induktionsspule mit elektrischer Leistung beschickt und das Werkstück der Härte-Induktionsspule zugeführt ist, Messeinrichtungen, die wenigstens einige der Betriebsparameter des Wechselstromumrichters erfassen, wobei die Induktionshärtungsanlage dazu eingerichtet ist, sie mit einer elektronischen Rechneinheit zu verbinden, die in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten erzeugt und an einer Ausgabereinrichtung ausgibt, um die Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter im Sinne einer Optimierung der Leistungsaufnahme der Härte-Induktionsspule zu beeinflussen. Damit ist es möglich, ohne spezifisches Wissen und Erfahrung um die Funktionsweise der Induktionshärtungsanlage diese für neue Härtungsaufgaben (also das Festlegen der wesentlichen Betriebsparameter der Induktionshärtungsanlage bei einer neuen Werkstückform mit einer entsprechend gestalteten Härte-Induktionsspule) auszurüsten und einzurichten.

50

[0013] Dabei hat die Erfindung erkannt, dass den Parametern des Betriebsstroms, mit dem der Induktor beschickt wird (Strom, Spannung, Frequenz, und Leistung), besondere Bedeutung im Hinblick auf den Wirkungsgrad und der Leistungsaufnahme der Induktionshärtungsanlage zukommt. Die Festlegung dieser Parameter ist entscheidend dafür, dass Schwingkreisumrichter optimal arbeiten indem sie an ihre Last, also die Härte-Induktionsspule (und das mit ihr bearbeitete Werkstück) angepasst werden. Die Erfindung macht sich dazu die Erkenntnis zunutze, dass anfänglich eine praktisch beliebige Einstellung des Schwingkreisumrichters als Ausgangspunkt verwendet werden kann, um die Betriebsparameter auch bei unbekanntem elektrischen Eigenschaften der Härte-Induktionsspule zu verbessern.

55

[0014] Dazu ist die elektronische Rechneinheit eingerichtet und programmiert, auf ein vorzugsweise vereinfachtes mathematisches Ersatzmodell des Wechselstromumrichters zuzugreifen, das in der elektronischen Rechneinheit bereitgehalten ist, wobei das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters zumindest den Einfluß von Veränderungen wenigstens einer der variablen Komponenten auf wenigstens einen Betriebsparameter des Wechselstromumrichters zu berücksichtigen eingerichtet ist.

[0015] Insbesondere kann die elektronische Rechneinheit dazu eingerichtet und programmiert sein, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters mit einem beliebigen Vorgaben-Satz für die wenigstens eine der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters und einem Startwerte-Satz der Betriebsparameter durchzurechnen, wobei der Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus einem ersten Härtungsvorgang resultiert, um einen neuen

5

Vorgaben-Satz für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters im Sinne einer Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter auszugeben.

[0016] Weiterhin kann die elektronische Rechneinheit dazu eingerichtet und programmiert sein, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters mit einem verbesserten Vorgaben-Satz für die wenigstens eine der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters und einem Messwerte-Satz der Betriebsparameter durchzurechnen, wobei

10

der Messwerte-Satz der Betriebsparameter aus einem weiteren Härtungsvorgang resultiert, um einen neuen Vorgaben-Satz für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters im Sinne einer weiteren Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter auszugeben.

[0017] Schließlich kann die elektronische Rechneinheit dazu eingerichtet und programmiert sein, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters nicht weiter durchzurechnen, wenn keine relevante Änderung des Vorgaben-

15

Satzes für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters auftritt.

[0018] Erfindungsgemäß kann die variable Komponente des Wechselstromumrichters ein Schwingkreiskondensator eines Schwingkreises, eine Schwingkreisinduktivität eines Schwingkreises oder ein Übersetzungsverhältnis eines die Schwingkreisinduktivität enthaltenden Ausgangstransformators, die Amplitude der Speisespannung einer Halbleiterbrückenordnung, oder eine Schaltfrequenz der Halbleiterbrückenordnung sein.

20

[0019] Dabei kann bei der erfindungsgemäßen Induktionshärtungsanlage die variable Komponente des Wechselstromumrichters in diskreten Stufen oder stufenlos zu verändern sein.

[0020] Der Wechselstromumrichter kann in einer erfindungsgemäßen Ausführungsform ein von einer Brückenschaltung gespeister LC-Serienschwingkreis mit transformatorischer Leistungsauskopplung sein, wobei der Schwingkreiskondensator und/oder das Übersetzungsverhältnis eines die Schwingkreisinduktivität enthaltenden Ausgangstransformators in diskreten Stufen oder stufenlos zu verändern ist. Der Wechselstromumrichter kann aber auch ein Parallelschwingkreis sein oder auf einem andere elektrischen Schaltungs-/Funktionsprinzip basieren. Wesentlich ist nur, dass es möglich ist, davon ein mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters erstellt werden kann, das als Grundlage für die Berechnung eines verbesserten Vorgaben-Satzes für die wenigstens eine der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters basierend auf einem Messwerte-Satz der Betriebsparameter dienen kann.

25

[0021] Bei der erfindungsgemäßen Induktionshärtungsanlage ist der Wechselstromumrichter in oder nahezu in Resonanz des Schwingkreises zu betreiben. Dabei hängt die Schwankung der Betriebsfrequenz um den Resonanzpunkt zum einen von dem Prinzip des Wechselstromumrichter ab und zum anderen davon, ob die Leistungsregelung durch gezieltes Verstimmen des Wechselstromumrichter aus dem Resonanzpunkt erfolgt.

30

[0022] Erfindungsgemäß kann der Wechselstromumrichter auch so zu betreiben sein, dass die der Härte-Induktionsspule zugeführte Wechselspannung und der der Härte-Induktionsspule zugeführte Wechselstrom einen Phasenwinkel $\varphi \neq 0$ zueinander haben.

35

[0023] Weitere Merkmale, Eigenschaften, Vorteile und mögliche Abwandlungen werden anhand der nachstehenden Beschreibung erläutert, in der auf die beigefügten Zeichnungen Bezug genommen ist.

40

Kurzbeschreibung der Zeichnung

[0024] In Fig. 1a ist das Prinzip einer erfindungsgemäßen Induktionshärtungsanlage schematisch veranschaulicht.

[0025] In Fig. 1b ist die Abhängigkeit der Stromeindringtiefe/Härtetiefe von der Betriebsfrequenz der Induktionsanlage aufgrund des sog. Skin-Effektes schematisch veranschaulicht.

45

[0026] In Fig. 2 ist eine erfindungsgemäße Induktionshärtungsanlage als schematisches Blockschaltbild veranschaulicht.

[0027] In Fig. 2a ist ein vereinfachtes elektrisches Schaltbild eines Wechselstromumrichter mit einem von einer Transistorvollbrückenschaltung gespeisten LC-Serienschwingkreis mit transformatorischer Leistungsauskopplung sein.

[0028] In Fig. 2b zeigt das elektrische Ersatzschaltbild des Wechselstromumrichters aus Fig. 2a und dessen vereinfachtes mathematisches Ersatzmodell.

50

Detaillierte Beschreibung derzeit bevorzugter Ausführungsformen

[0029] In Fig. 2 ist eine Ausführungsform einer erfindungsgemäß Induktionshärtungsanlage schematisch veranschaulicht, wobei nur die Komponenten dargestellt und hier auch beschrieben sind, welche für das Verständnis der Erfindung erforderlich sind.

55

[0030] Die Induktionshärtungsanlage dient zur Wärmebehandlung von elektrisch leitenden Werkstücken 10. Die Anlage hat einen Wechselstromumrichter 12, der in dieser Ausführungsform hinsichtlich seiner Betriebsparameter Aus-

gangsspannung U, Ausgangsstrom I, Frequenz der Ausgangsspannung f, Ausgangs(wirk)leistung P durch Veränderung zweier variabler Komponenten steuerbar ist. Wie dies erfolgt, ist weiter unten im Detail erläutert.

[0031] Der Wechselstromumrichter 12 ist elektrisch mit einer Härte-Induktionsspule 14 verbunden. Diese hat eine an die Gestalt des zu behandelnden Werkstücks 10 angepasste Form, um das Werkstück 10 in einem Härtungsvorgang zu erwärmen. Dazu beschickt der Wechselstromumrichter 12 die Härte-Induktionsspule 14 mit elektrischer Leistung wenn/während das Werkstück 10 der Härte-Induktionsspule 14 zugeführt ist/wird.

[0032] Dem Wechselstromumrichter 12 sind mehrere Messeinrichtungen A1 .. An in Form von Spannungs-, Strom-, Frequenzaufnehmern oder dergl. zugeordnet, um relevante Betriebsparameter des Wechselstromumrichters 12 erfassen und ggf. in ein weiterverarbeitbares Format/ Datensignal umzusetzen.

[0033] Schließlich ist die Induktionshärtungsanlage mit einer elektronischen Rechneinheit ECU verbunden. Diese erzeugt in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung einer der variablen Komponenten Cs, Np und gibt diese an einer Ausgabereinrichtung 16 aus, um die Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichters 12 im Sinne einer Optimierung der Leistungsaufnahme der Härte-Induktionsspule 14 zu beeinflussen.

[0034] Dies wird in der vorliegenden Ausführungsform der Erfindung dadurch erreicht, das die elektronische Rechneinheit ECU dazu eingerichtet und programmiert ist, auf ein vereinfachtes mathematisches Ersatzmodell des Wechselstromumrichters 12 zuzugreifen. Dieses Ersatzmodell ist in der elektronischen Rechneinheit ECU bereitgehalten und ist ausgehend von der tatsächlichen Schaltung und Funktionsweise des Wechselstromumrichters 12 so modelliert; dass es den Einfluß von Veränderungen wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters 12 auf wenigstens einen Betriebsparameter des Wechselstromumrichters 12 zu berücksichtigen eingerichtet ist. Dabei ist mit anderen Worten das Ersatzmodell in der Lage zu ermitteln, wie sich der Wechselstromumrichter 12 mit angeschlossener Härte-Induktionsspule 14 im Betrieb beim Härten eines Werkstückes 10 verhält, ohne dass im Einzelnen die Daten der Härte-Induktionsspule 14 (oder des Wechselstromumrichter 12) bekannt sein müßten.

[0035] Im vorliegenden Ausführungsbeispiel hat die die Induktionshärtungsanlage einen Wechselstromumrichter 12 mit einem von einer Transistor-Vollbrückenordnung T1 .. T4 gespeister LC-Serienschwingkreis mit transformatorischer Leistungsauskopplung. Der primäre Schwingkreiskondensator Cp und das Übersetzungsverhältnis Np/Ns eines die Schwingkreisinduktivität Lp enthaltenden Ausgangstransformators T ist dabei in diskreten Stufen zu verändern. Die Transistoren T1 .. T4 können sog. FETen (*Feld Effekt Transistor*) sein, deren Serienwiderstand im eingeschalteten Zustand mit R_{DSON} bezeichnet ist. Die (komplexen) Leitungswiderstände, welche insbesondere auf der Sekundärseite nennenswert sein können, finden als Rz, Lz Berücksichtigung(siehe Fig. 2a).

[0036] Grundsätzlich sind folgende Komponenten des Wechselstromumrichters variabel gestaltbar:

- ein Schwingkreiskondensator Cp, Cs des Schwingkreises,
- eine Schwingkreisinduktivität Lp, Ls eines Schwingkreises oder
- ein Übersetzungsverhältnis Np/Ns eines Ausgangstransformators T,
- die Amplitude der Speisespannung einer Halbleiterbrückenordnung T1 .. T4, oder
- eine Schaltfrequenz der Halbleiterbrückenordnung T1 .. T4.

[0037] Anstatt die variable(n) Komponente(n) des Wechselstromumrichters in diskreten Stufen zu verändern, kann dies auch stufenlos möglich sein. Im vorliegenden Beispiel ist der Wechselstromumrichter zumindest nahezu in Resonanz des Schwingkreises zu betreiben. In diesem Fall gilt, dass die Betriebsfrequenz $\omega = \omega_{res} = 2 \cdot \pi \cdot f = 1/(L \cdot C)^{1/2}$ ist.

[0038] Nachstehend ist erläutert, wie die elektronische Rechneinheit ECU in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung einer der variablen Komponenten Cs, Np ermittelt um die Leistungsabgabe des Wechselstromumrichters zu optimieren.

(A) Dazu ist die elektronische Rechneinheit ECU mit einer Computer-Softwareprogramm-Komponente ausgestattet, die das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters 12 mit einem beliebigen Vorgaben-Satz aus einem für die variablen Komponenten des Wechselstromumrichters gültigen Wertebereich und einem Startwerte-Satz der Betriebsparameter durchrechnet. Dabei stammt der Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus den Messeinrichtungen A1 .. An in Form von Spannungs-, Strom-, Frequenzwerten während eines ersten Härtungsvorganges und dient dazu, einen neuen Vorgaben-Satz für die Veränderung einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters im Sinne einer Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter auszugeben.

(B) Dieser neue, verbesserte Vorgaben-Satz wird dem Wechselstromumrichter zugeführt, indem seine variablen Komponenten entsprechend gestellt werden. Anschließend wird ein neuer Härtungsvorgang durchgeführt und die dabei erhaltenen Betriebsparameter aus den Messeinrichtungen A1.. An in Form von Spannungs-, Strom-, Frequenzwerten erfaßt. Mit diesem erhaltenen Messwerte-Satz der Betriebsparameter wird das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters erneut durchgerechnet, um einen neuen Vorgaben-Satz für die Verände-

EP 1 763 285 A1

zung wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters im Sinne einer weiteren Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichters auszugeben.

5 **[0039]** Dieser vorstehend beschriebene Vorgang (B) wird so oft wiederholt, bis keine relevante Änderung des Vorgaben-Satzes für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten des Wechselstromumrichters auftritt.

[0040] Nachstehend wird anhand eines konkreten Ausführungsbeispiels die Funktionsweise der Erfindung weiter verdeutlicht:

10 Ein Wechselstromumrichter hat eine vereinfachte Schaltung wie in Fig 2a, 2b gezeigt und hat außerdem folgende Basisdaten:

- P_{\max} : 90 kWatt
- U_{\max} : 300 Volt
- I_{\max} : 450 Ampere

15 Die variablen Komponenten des Wechselstromumrichters sind das Übersetzungsverhältnis N_p/N_s des Transformators T mit einem Wertebereich von 4/1, 6/1, 8/1, 10/1, 13/1 und 16/1 als möglichen Einstellungen sowie der Sekundärkondensator C_s des Schwingkreises mit einem Wertebereich von $8 \dots 51 \cdot 0,33$ microFarad als möglichen Einstellungen.

20 Die Schwingkreisgüte Q ergibt sich zu

$$25 \quad Q = \omega_{\text{res}} \cdot L'/R' = (L'/C)^{1/2} \cdot 1/R'$$

30 **[0041]** Zuerst werden die variablen Komponenten des Wechselstromumrichters auf die (beliebigen Vorgabenwerte $(N_p/N_s)_{\text{ist}} := 4/1$ und $C_{s_{\text{ist}}} := 30 \cdot 0,33$ microFarad gesetzt. Dann wird ein erster Härtungsvorgang ausgeführt. Hierbei wird ein Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus den Messeinrichtungen A1 .. An in Form von Spannungs- und Stromwerten ermittelt. Im Beispiel wurde $U_{\text{ist}}: 75$ Volt und $I_{\text{ist}}: 450$ Ampere ermittelt. Dieser Startwerte-Satz dient als Eingangsgröße für das mathematische Ersatzmodell, bei dem das optimale Übersetzungsverhältnis $(N_p/N_s)_{\text{opt}}$ des Transformators T sich ergibt zu

$$35 \quad (N_p/N_s)_{\text{opt}} = (N_p/N_s)_{\text{ist}} \cdot (I_{\text{ist}}/U_{\text{ist}} \cdot I_{\max}/U_{\max})^{1/2}$$

40 **[0042]** Mit den vorliegenden Daten wird ein $(N_p/N_s)_{\text{opt}} = 8$ bestimmt.

Dieser neue Wert wird (bei unverändertem Sekundärkondensator C_s) dem Wechselstromumrichter zugeführt, in dem automatisch oder manuell das Übersetzungsverhältnis N_p/N_s des Transformators T auf 8/1 gestellt wird.

45 **[0043]** Mit diesen Werten wird ein neuer Härtungsvorgang gestartet und erneut ein Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus den Messeinrichtungen A1 .. An in Form von Spannungs- und Stromwerten ermittelt. Im Beispiel wurde $U_{\text{ist}}: 140$ Volt und $I_{\text{ist}}: 306$ Ampere ermittelt. Dieser Startwerte-Satz dient wieder als Eingangsgröße für das mathematische Ersatzmodell. Mit den vorliegenden Daten wird das optimale Übersetzungsverhältnis $(N_p/N_s)_{\text{opt}}$ des Transformators T von 9,32 (= ungefähr 10) ermittelt.

[0044] Dieser neue Wert $T= 10$ wird (bei unverändertem Sekundärkondensator C_s) dem Wechselstromumrichter zugeführt, in dem automatisch oder manuell das Übersetzungsverhältnis N_p/N_s des Transformators T auf 10/1 gestellt wird.

50 **[0045]** Mit diesen Werten wird ein neuer Härtungsvorgang gestartet und erneut ein Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus den Messeinrichtungen A1 .. An in Form von Spannungs- und Stromwerten ermittelt. Im Beispiel wurde $U_{\text{ist}}: 185$ Volt und $I_{\text{ist}}: 243$ Ampere ermittelt. Dieser Startwerte-Satz dient wieder als Eingangsgröße für das mathematische Ersatzmodell. Mit den vorliegenden Daten wird das optimale Übersetzungsverhältnis $(N_p/N_s)_{\text{opt}}$ des Transformators T von 9,35 ermittelt.

55 **[0046]** Da sich an der Einstellung des Übersetzungsverhältnisses (N_p/N_s) des Transformators T von 10/1 nichts ändert, ist dies auch keine relevante Änderung des Vorgaben-Satzes für die Veränderung des Übersetzungsverhältnis $(N_p/N_s)_{\text{opt}}$ des Transformators T des Wechselstromumrichters. Mithin ist die Einstellung der variablen Komponenten im Sinne einer optimalen (=maximalen) Leistungsabgabe des Wechselstromumrichters erreicht.

[0047] Sofern eine Änderung der Frequenz des Wechselstromumrichters angestrebt wird um zum Beispiel die Härtetiefe für das Werkstück zu variieren, kann dies durch die Veränderung des Kondensators C' erfolgen, wobei auch hierzu die elektronische Rechneinheit ECU mit einer Computer-Softwareprogramm-Komponente ausgestattet ist, die das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters 12 mit einem beliebigen Vorgaben-Satz aus einem für die variablen Komponenten des Wechselstromumrichters gültigen Wertebereich und einem Startwerte-Satz der Betriebsparameter durchrechnet. Hierbei werden die für das mathematische Ersatzmodell geltenden Beziehungen verwendet:

$$f_{\text{neu}} = f_{\text{ist}} \cdot \left(C_{\text{ist}} / C_{\text{neu}} \right)^{1/2}$$

[0048] Es versteht sich weiterhin, dass die vorstehenden Beziehungen, welche explizit für Serienschwingkreis-Umrichter gelten, entsprechend auch für Parallelschwingkreis-Umrichter abgewandelt werden können und dann in der die elektronische Rechneinheit ECU als Computer-Softwareprogramm-Komponente eingesetzt werden können.

Patentansprüche

1. Eine Induktionshärtungsanlage zur Wärmebehandlung von elektrisch leitenden Werkstücken (10), mit
 - einem, hinsichtlich wenigstens einigen seiner Betriebsparameter (U, I, f, P) durch Veränderung variabler Komponenten (Cs, Np) steuerbaren Wechselstromumrichter (12),
 - wenigstens einer mit dem Wechselstromumrichter (12) elektrisch zu verbindenden Härte-Induktionsspule (14), die eine an die Gestalt wenigstens einer zu behandelnden Stelle der Werkstücke (10) angepasste Form hat, um das Werkstück (10) zumindest an dieser Stelle in einem Härtungsvorgang mittels der Härte-Induktionsspule (14) zu erwärmen, wenn der Wechselstromumrichter (12) die Härte-Induktionsspule (14) mit elektrischer Leistung beschickt und das Werkstück (10) der Härte-Induktionsspule (14) zugeführt ist,
 - Messeinrichtungen (A1 .. An), die wenigstens einige der Betriebsparameter des Wechselstromumrichters (12) erfassen, wobei
 - die Induktionshärtungsanlage dazu eingerichtet ist, sie mit einer elektronischen Rechneinheit (ECU) zu verbinden, die in Abhängigkeit von den erfassten Betriebsparametern Vorgaben für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten (Cs, Np) erzeugt und an einer Ausgabeeinrichtung (16) ausgibt, um die Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter (12) im Sinne einer Optimierung der Leistungsaufnahme der Härte-Induktionsspule (14) zu beeinflussen.
2. Die Induktionshärtungsanlage nach Anspruch 1, bei der die elektronische Rechneinheit (ECU) dazu eingerichtet und programmiert ist, auf ein vorzugsweise vereinfachtes mathematisches Ersatzmodell des Wechselstromumrichters (12) zuzugreifen, das in der elektronischen Rechneinheit (ECU) bereitgehalten ist, wobei das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters (12) zumindest den Einfluß von Veränderungen wenigstens einer der variablen Komponenten (Cs, Np) auf wenigstens einen Betriebsparameter des Wechselstromumrichters (12) zu berücksichtigen eingerichtet ist.
3. Die Induktionshärtungsanlage nach Anspruch 1 oder 2, bei der die elektronische Rechneinheit (ECU) dazu eingerichtet und programmiert ist, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters (12) mit einem beliebigen Vorgaben-Satz für die wenigstens eine der variablen Komponenten (Cs, Np) des Wechselstromumrichters (12) und einem Startwerte-Satz der Betriebsparameter durchzurechnen, wobei der Startwerte-Satz der Betriebsparameter aus einem ersten Härtungsvorgang resultiert, um einen neuen Vorgaben-Satz für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten (Cs, Np) des Wechselstromumrichters (12) im Sinne einer Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter (12) auszugeben.
4. Die Induktionshärtungsanlage nach Anspruch 3, bei der
 - die elektronische Rechneinheit (ECU) dazu eingerichtet und programmiert ist, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters (12) mit einem verbesserten Vorgaben-Satz für die wenigstens eine der variablen Komponenten (Cs, Np) des Wechselstromumrichters (12) und einem Messwerte-Satz der Betriebsparameter durchzurechnen, wobei der Messwerte-Satz der Betriebsparameter aus einem weiteren Härtungsvorgang resultiert, um einen neuen Vorgaben-Satz für die Veränderung wenigstens einer der variablen Kom-

EP 1 763 285 A1

ponenten (Cs, Np) des Wechselstromumrichters (12) im Sinne einer weiteren Verbesserung der Leistungsabgabe des steuerbaren Wechselstromumrichter (12) auszugeben.

5
5. Die Induktionshärtungsanlage nach Anspruch 3 oder 4, bei der

- die elektronische Rechneinheit (ECU) dazu eingerichtet und programmiert ist, das mathematische Ersatzmodell des Wechselstromumrichters (12) nicht weiter durchzurechnen, wenn keine relevante Änderung des Vorgaben-Satzes für die Veränderung wenigstens einer der variablen Komponenten (Cs, Np/Ns) des Wechselstromumrichters (12) auftritt.

10
6. Die Induktionshärtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die variable Komponente des Wechselstromumrichters (12)

15
- ein Schwingkreiskondensator (Cs) eines Schwingkreises,
- eine Schwingkreisinduktivität (Lp, Ls) eines Schwingkreises oder
- ein Übersetzungsverhältnis (Np/Ns) eines die Schwingkreisinduktivität enthaltenden Ausgangstransformators (T),
- die Amplitude der Speisespannung einer Halbleiterbrückenordnung (T1 .. T4), oder
- eine Schaltfrequenz der Halbleiterbrückenordnung (T1 .. T4) ist.

20
7. Die Induktionshärtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die variable Komponente (Cs, Np/Ns) des Wechselstromumrichters (12) in diskreten Stufen oder stufenlos zu verändern ist.

25
8. Die Induktionshärtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Wechselstromumrichter (12) ein von einer Brückenschaltung gespeister LC-Serienschwingkreis mit transformatorischer Leistungsauskopplung ist, wobei der Schwingkreiskondensator und/oder das Übersetzungsverhältnis eines die Schwingkreisinduktivität enthaltenden Ausgangstransformators in diskreten Stufen oder stufenlos zu verändern ist.

30
9. Die Induktionshärtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Wechselstromumrichter (12) in oder nahezu in Resonanz des Schwingkreises zu betreiben ist.

35
10. Die Induktionshärtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Wechselstromumrichter (12) so zu betreiben ist, dass die der Härte-Induktionsspule (14) zugeführte Wechselspannung und der der Härte-Induktionsspule (14) zugeführte Wechselstrom einen Phasenwinkel ($\varphi \neq 0$) zueinander haben.

Fig. 1a

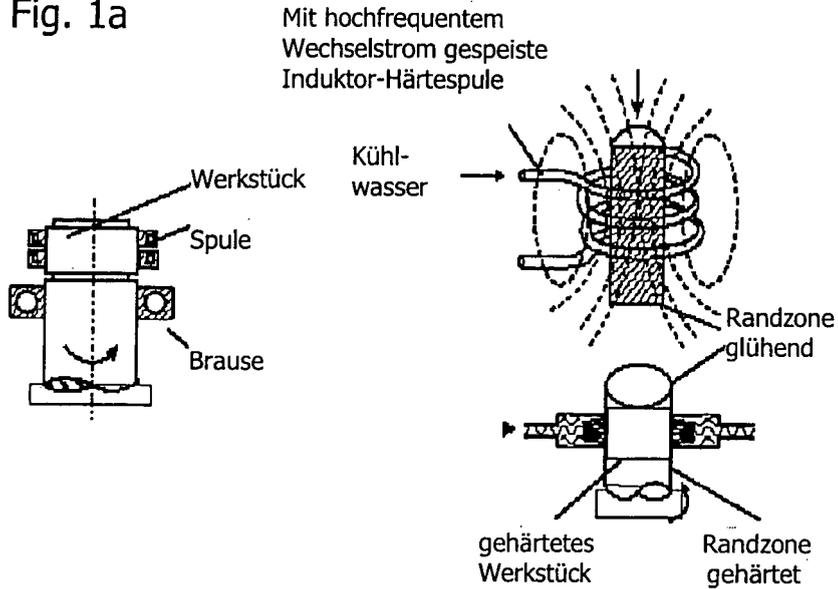


Fig. 1b

$$I_x = i_0 \exp(-x/\delta)$$

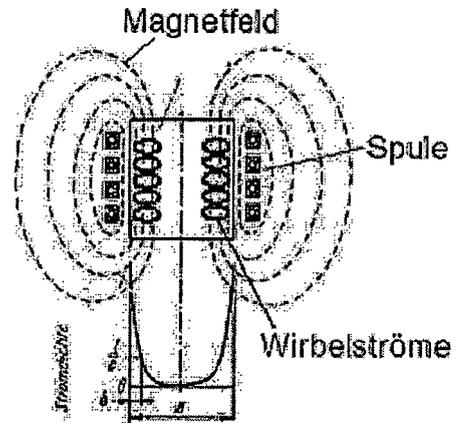
I_x = Stromdichte in der Tiefe x

i_0 = Stromdichte an der Oberfläche

x = Abstand vom Rand

δ = Eindringtiefe (Tiefe, bei der die Stromdichte auf $1/e = 0,37$ abgefallen ist)

In der Randschicht δ fließen 63 % des Stroms (= 86 % der Wärmemenge)



$$\delta = k(\rho/f\mu)^{0,5}$$

Eindringtiefe δ hängt von der Frequenz f , vom spezifischen elektrischen Widerstand ρ und von der Permeabilität μ ab

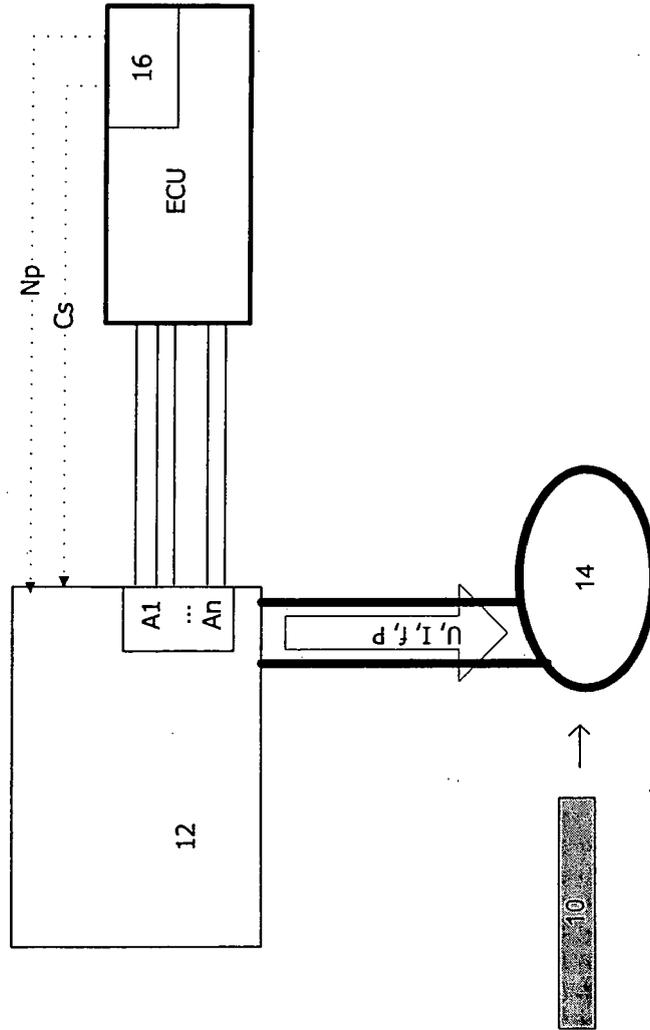
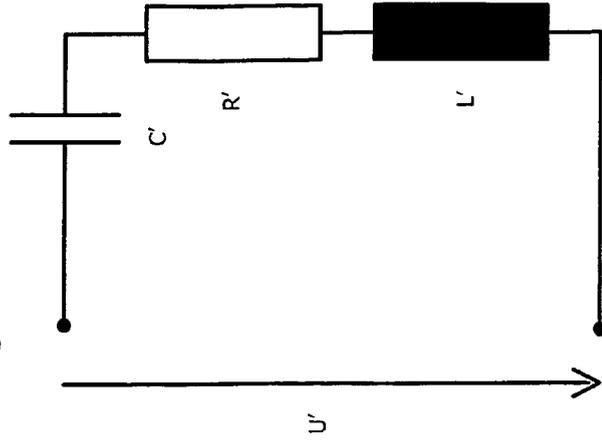


Fig. 2

Fig. 2b

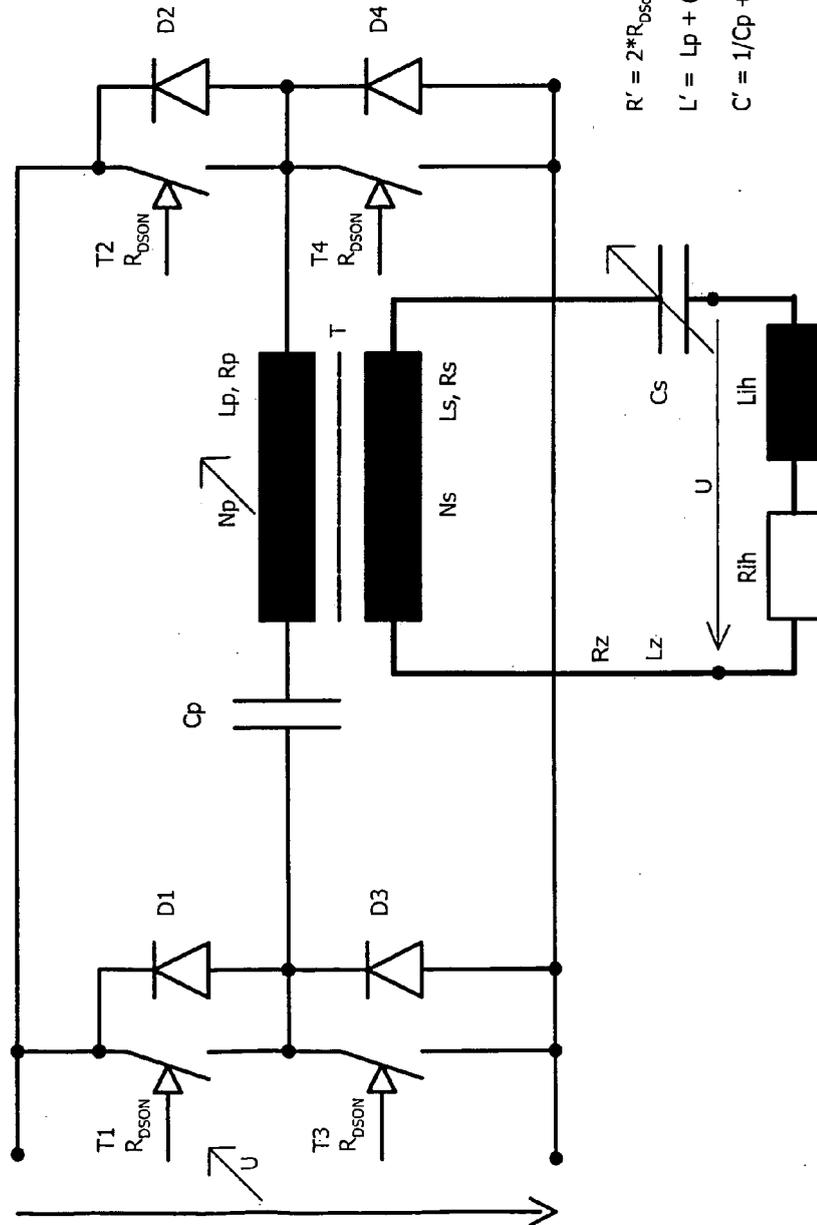


$$R' = 2 \cdot R_{\text{DSON}} + R_p + (N_p^2/N_s^2) \cdot [R_s + R_z + R_{ih}]$$

$$L' = L_p + (N_p^2/N_s^2) \cdot [L_s + L_z + L_{ih}]$$

$$C' = 1/C_p + (N_p^2/N_s^2)/C_s$$

Fig. 2a





| EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE | | | |
|---|--|--|------------------------------------|
| Kategorie | Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile | Betrifft Anspruch | KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC) |
| X | EP 0 113 704 A (SAPHYMO STEL [FR]) 18. Juli 1984 (1984-07-18) * Zusammenfassung; Abbildungen 1,2,4 * ----- | 1,2,9,10 | INV. H05B6/04 C21D1/42 |
| X | US 4 161 206 A (KINDLMANN PETER J [US] ET AL) 17. Juli 1979 (1979-07-17) * Zusammenfassung; Abbildungen 3,4 * ----- | 1,2,9,10 | |
| A | US 6 124 581 A (ULRICH MARK [US]) 26. September 2000 (2000-09-26) * Abbildung 5 * ----- | 6,8 | |
| X,P | WO 2005/107050 A2 (EMA INDUTEC GMBH [DE]; LEISTER MICHAEL [DE]) 10. November 2005 (2005-11-10) * das ganze Dokument * ----- | 1 | |
| A | EP 0 460 892 A2 (HITACHI LTD [JP]) 11. Dezember 1991 (1991-12-11) * das ganze Dokument * ----- | | |
| | | | RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) |
| | | | H05B |
| Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt | | | |
| Recherchenort München | | Abschlußdatum der Recherche 30. Januar 2007 | Prüfer Tasiaux, Baudouin |
| KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur | | T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument | |

3
EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 06 01 9197

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

30-01-2007

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument | | Datum der Veröffentlichung | | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|---|------------|-------------------------------|----|-----------------------------------|-------------------------------|
| EP 0113704 | A | 18-07-1984 | ES | 8407640 A1 | 16-12-1984 |
| | | | FR | 2539265 A1 | 13-07-1984 |
| ----- | | | | | |
| US 4161206 | A | 17-07-1979 | AU | 523771 B2 | 12-08-1982 |
| | | | AU | 4192978 A | 22-11-1979 |
| | | | BE | 872442 A1 | 30-05-1979 |
| | | | BR | 7808062 A | 18-12-1979 |
| | | | CA | 1115769 A1 | 05-01-1982 |
| | | | CH | 642290 A5 | 13-04-1984 |
| | | | DE | 2853792 A1 | 22-11-1979 |
| | | | ES | 475434 A1 | 16-01-1980 |
| | | | ES | 478869 A1 | 01-08-1979 |
| | | | FR | 2425904 A1 | 14-12-1979 |
| | | | GB | 2020855 A | 21-11-1979 |
| | | | IT | 1107597 B | 25-11-1985 |
| | | | JP | 1344549 C | 29-10-1986 |
| | | | JP | 54149323 A | 22-11-1979 |
| | | | JP | 61009097 B | 19-03-1986 |
| | | | KR | 8102034 A | 21-12-1981 |
| | | | MX | 150899 A | 13-08-1984 |
| | | | PL | 211649 A1 | 11-02-1980 |
| SE | 440862 B | 26-08-1985 | | | |
| SE | 7812007 A | 16-11-1979 | | | |
| SU | 1209022 A3 | 30-01-1986 | | | |
| YU | 302678 A1 | 30-04-1983 | | | |
| ----- | | | | | |
| US 6124581 | A | 26-09-2000 | CA | 2242442 A1 | 16-01-1999 |
| | | | US | 6316755 B1 | 13-11-2001 |
| ----- | | | | | |
| WO 2005107050 | A2 | 10-11-2005 | DE | 102004021217 A1 | 08-12-2005 |
| | | | EP | 1745542 A2 | 24-01-2007 |
| ----- | | | | | |
| EP 0460892 | A2 | 11-12-1991 | DE | 69121789 D1 | 10-10-1996 |
| | | | DE | 69121789 T2 | 03-04-1997 |
| | | | US | 5430642 A | 04-07-1995 |
| ----- | | | | | |

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82