



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



Veröffentlichungsnummer: **0 484 359 B1**

12

## EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

Veröffentlichungstag der Patentschrift: **12.10.94**

Int. Cl.<sup>5</sup>: **C21D 11/00, H05B 6/06**

Anmeldenummer: **90910724.5**

Anmeldetag: **26.07.90**

Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP90/01225**

Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 91/02096 (21.02.91 91/05)**

**VERFAHREN ZUR WERKSTOFFABHÄNGIGEN STEUERUNG VON WÄRMEBEHANDLUNGSPROZESSEN VON METALLEN UND VORRICHTUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS.**

Priorität: **28.07.89 DE 3925047**

**(P-767), 10 May 1988 & JP-A- 63 120316**

Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**13.05.92 Patentblatt 92/20**

Patentinhaber: **Gattermeier, Helmut, Dipl.-Ing.**  
**Hainbrunner Weg 12**  
**D-69434 Brombach (DE)**

Bekanntmachung des Hinweises auf die  
Patenterteilung:  
**12.10.94 Patentblatt 94/41**

Erfinder: **BRAISCH, Paul**  
**Kurfürstenanlage 61**  
**D-69115 Heidelberg (DE)**

Benannte Vertragsstaaten:  
**BE CH DE ES FR GB IT LI NL SE**

Vertreter: **Meyer-Roedern, Giso, Dr.**  
**Bergheimer Strasse 10-12**  
**D-69115 Heidelberg (DE)**

Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 251 333**  
**GB-A- 2 192 294**  
**US-A- 4 816 633**

**International Journal of Electronics, Vol. 65,**  
**No. 5, November 1988, (London, GB) J. Lei-**  
**sten et al.: "Microprocessor control of a**  
**transistorized induction heating power**  
**supply" pages 1039- 1047**

**Patent Abstracts of Japan, Vol. 370, No. 12**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**EP 0 484 359 B1**

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen bei induktiver Erwärmung in einem geschlossenen Regelkreis, wenn bei sonst vorgegebenen und genau reproduzierten Maschinenparametern das Bearbeitungsergebnis von den einer Zufallsänderung unterliegenden Werkstoffeigenschaften beeinflusst wird, insbesondere durch zufällige Veränderung des metallurgischen Umwandlungsverhaltens, der elektrischen oder magnetischen Eigenschaften und ähnliches, sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Die erfolgreiche Anwendung zahlreicher Wärmebehandlungsverfahren hängt davon ab, daß alle den Behandlungsprozeß bestimmenden Bedingungen von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus konstant bleiben bzw. mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Dazu kann gehören, daß dann auch bestimmte Werkstoffeigenschaften, wie z.B. das Ausgangsgefüge der jeweils bearbeiteten Werkstücke, von Teil zu Teil konstant bleiben müssen bzw. nur in engen Toleranzen variieren dürfen. Eine solche Forderung wird insbesondere dann gestellt, wenn z.B. bei der induktiven Randschichthärtung die Härteergebnisse von den Härtebarkeitseigenschaften des Ausgangsmaterials abhängen.

Es sind zahlreiche Verfahren bekannt geworden, die auf eine genaue Reproduzierung der anlagenseitig bestimmten Prozeßkenngrößen zielen, in bezug auf eine Beherrschung des Prozesses aber darauf angewiesen sind, daß sich die maßgeblichen Werkstoffeigenschaften nicht zufallsartig ändern. So wird im International Journal of Electronics, Vol. 65, No. 5, November 88, (London, GB) J. Leisten et al.: "Microprocessor control of a transistorized induction heating power supply" u.a. ein Verfahren beschrieben (Seite 1041, Zeilen 1 bis 19; Seite 1043, Zeilen 20 bis 23; Seite 1044, Zeilen 1 bis 10; Seite 1047, Zeilen 22 bis 23), das dadurch gekennzeichnet ist, daß es sich auf einen Mikroprozessor stützt, Abweichungen der Prozeßkenngrößen Erwärmungsleistung und/oder Temperatur von einem vor Beginn eines Prozeßzyklus in den Rechner eingegebenen und gespeicherten Ablauf kontinuierlich erfaßt und in Echtzeit gegensteuert, nämlich dergestalt, daß die Abweichung der kontrollierten Prozeßgröße von dem vorgegebenen Verlauf während des gesamten Prozeßzyklus und zu jedem beliebigen Zeitpunkt gegen Null strebt.

Ein ähnliches rechnergestütztes Verfahren wird im britischen Patent GB, A, 2 192 294 beschrieben, das gemäß Anspruch 1 dem Zweck dient, das Temperaturprofil von induktiv erwärmten Stangenenden während des gesamten Erwärmungsprozesses kontinuierlich mit einem vorgegebenen Tempera-

turprofil zu vergleichen und, falls Abweichungen vorliegen, die Erwärmungsleistung in Echtzeit so zu steuern, daß die Abweichungen minimiert werden.

5 Auch die Verfahren, die im EP, A, 0 251 333- (Anspruch 4) und im US, A, 4816633 (Anspruch 1-(d)) beschrieben werden, dienen dem Ziel, momentane Werte unterschiedlicher Prozeßkenngrößen in Echtzeit, jedoch vor Zyklusbeginn vorgegebenen Werten anzugleichen.

10 Somit ist diesen und ähnlichen im Bereich der induktiven Erwärmung eingesetzten Verfahren gemeinsam eigen, die Prozeßkenngrößen eines laufenden Zyklus gemäß einem jeweils vor Zyklusbeginn vorgegebenen Ablauf fortschreiten zu lassen, nämlich dadurch, daß Abweichungen von der Vorgabe in Echtzeit berechnet werden und die induktive Erwärmungsleistung während des gesamten laufenden Zyklus dergestalt gesteuert wird, daß 20 besagte Abweichungen jederzeit gegen Null streben. Auf diese Weisen wird, in Anlehnung an andere Bereichen der Technik, jeweils ein Regelkreis aufgebaut und dazu genutzt, in allen Zyklen einer Serienfertigung eine möglichst genaue Reproduzierung der Prozeßkenngrößen zu gewährleisten. In einem Falle aber, in dem das Behandlungsergebnis von den Eigenschaften des behandelten Werkstoffs abhängt, ist ein Regelkreis erst dann vollständig, wenn er diesen Werkstoffeinfluß selbst in Echtzeit 25 erkennt und in erwünschter Weise bei der Prozeßsteuerung berücksichtigt. Ein solches leisten die genannten Verfahren jedoch nicht.

Die technische Lehre und die Erfahrung zeigt, daß veränderliche Gefügeeigenschaften beim induktiven Randschichthärten zu veränderlichen Umwandlungstemperaturen bzw. veränderlichen Randhärte-tiefen führt. Unter den Bedingungen einer auf hohem Qualitätsstand durchgeführten Fertigung, mit einem nur engen Streuband für die Randhärte-tiefe, ist in der Praxis oft beobachtet worden, daß 35 die zugelassene Streubreite nur deshalb überschritten wurde, weil das Härtebarkeitsverhalten der behandelten Teile zufallsartig und übermäßig streute.

Eine Möglichkeit der Forderung konstanter bzw. eingegatter Werkstoffeigenschaften des Ausgangsmaterials in der industriellen Praxis entgegenzukommen, besteht z.B. darin, daß die Werkstücke in getrennten Losen jeweils gleichen Ursprungs, z.B. aus einer gleichen Gießcharge, Walzcharge, Schmiedecharge usw., durch die Fertigung geschleußt werden. Eine solche Vorgehensweise hat jedoch die Nachteile, daß die Lose über eine erhebliche Anzahl von unterschiedlichen Arbeitsgängen getrennt verfolgt werden müssen und daß 45 bei jedem neuen Losanfang eine Neueinrichtung des Verfahrens notwendig ist. Beides ist mit erheblichen Kosten verbunden. Auch ist in Betracht zu ziehen, daß wegen menschlichen Versagens Ver-

mischungen auftreten. Darüber hinaus, ist es eine in der industriellen Praxis bekannte Tatsache, daß die Streubreite der maßgeblichen Werkstoffeigenschaften schon innerhalb solcherart zusammengestellter Lose oft so groß ist, daß die zugelassenen Bearbeitungstoleranzen nicht eingehalten werden können.

Es ist daher versucht worden, dem negativen Einfluß einer Zufallsänderung von Werkstoffeigenschaften auf das Bearbeitungsergebnis in einer Serienfertigung dadurch entgegenzutreten, daß an jedem einzelnen Werkstück eine automatische zerstörungsfreie Werkstoffanalyse durchgeführt und das Ergebnis der Analyse zur entsprechenden Prozeßsteuerung des nachfolgenden Bearbeitungszyklus verwendet wird. Zu diesem Zweck sind z.B. zur Ermittlung der chem. Zusammensetzung die Spektralanalyse oder zur Ermittlung des metallurgischen Ausgangsgefüges Wirbelstrom-, mikromagnetische oder Ultraschall-Meßverfahren eingesetzt worden. Solche Vorgehensweisen versagen jedoch prinzipiell, wenn die den Bearbeitungsprozeß beeinflussenden Werkstoffeigenschaften von der Ablaufgeschwindigkeit des Prozesses abhängen. So sind bei einer induktiven Erwärmung die genannten Vorgehensweisen z.B. nicht in der Lage, auf das von der Erwärmungsgeschwindigkeit abhängige metallurgische Umwandlungsverhalten des erwärmten Werkstückes bzw. Werkstoffes zu schließen. Daraus folgt, daß im Falle einer Wärmebehandlung mit Kurzzeitaustenitisierung und bei von Werkstück zu Werkstück zufallsartig schwankenden Werkstoffeigenschaften, das Bearbeitungsergebnis nicht mehr beherrscht werden kann.

Die Aufgabe der Erfindung besteht nun darin, ausgehend von dem aufgezeigten Stand der Technik ein Verfahren anzugeben, das den Prozeß der induktiven Wärmebehandlung dergestalt steuert, daß das Behandlungsergebnis in einer Serienproduktion trotz einer Zufallsänderung von beliebigen Werkstoffeigenschaften nicht oder in nur engen Grenzen streut.

Die Lösung dieser Aufgabe wird durch die Beobachtung vermittelt, daß bei der induktiven Erwärmung der prinzipiell bedingte, jeweils charakteristische zeitliche Verlauf der maßgeblichen elektrischen Prozeßkenngrößen  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  und  $f$  von den einschlägigen Werkstoffeigenschaften in spezifischer Weise beeinflusst wird. Die Lösung der Aufgabe stützt sich weiterhin auf die von der technischen Lehre vermittelten physikalischen und metallurgischen Gesetzmäßigkeiten, die den genannten spezifischen Beeinflussungen zugrunde liegen.

So ist bekannt, daß die Stromverteilung im Randbereich eines induktiv erwärmten Werkstückes sich in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung und den metallurgischen Phasenzuständen kontinuierlich vom Beginn bis an das Ende der

Erwärmung ändert. Es ist weiterhin bekannt, daß hierbei nicht nur die Temperatur, sondern auch die chem. Zusammensetzung, der Korngröße, der Gefügeart, der Seigerungen, die vorangegangenen Arbeitsgänge und weitere Faktoren eine Rolle spielen. Insbesondere ist bekannt, daß mit zunehmender Prozeß(Erwärmungs-)geschwindigkeit die Gefügeart bzw. die Verteilung des Kohlenstoffs zu Prozeßbeginn den weiteren Prozeßablauf bestimmen.

Mit Hilfe einer schon mit Prozeßbeginn einsetzenden vergleichenden Analyse des zeitlichen Verlaufs besagter Prozeßkenngrößen ist es daher möglich, auf die jeweils vorliegenden Werkstoffeigenschaften zu schließen bzw. eine gegenüber einem bekannten Stand zufallsartige Veränderung betragsmäßig festzustellen. Daraus ergibt sich weiter die Möglichkeit, unmittelbar zu erkennen, ob mit dem gegebenen zeitlichen Verlauf der Prozeßkenngrößen das erwünschte Bearbeitungsergebnis zu erreichen ist bzw., falls nicht, während des verbleibenden Zeitabschnittes bis zum Prozeßende die maßgeblichen Prozeßkenngrößen in geeigneter, d.h. werkstoffabhängig in kompensatorischer Weise zu steuern. Die rechnerische Bestimmung des jeweils erforderlichen Ausmaßes der kompensatorischen Steuerung im Hinblick auf das Erreichen des erwünschten Ergebnisses, erfolgt auf dem Wege der empirischen Bestimmung der jeweils gültigen quantitativen Zusammenhänge zwischen bestimmten Werkstoffeigenschaften, davon beeinflussten Prozeßkenngrößen und Behandlungsergebnissen.

Es ist daher Gegenstand der Erfindung, daß besagte Analyse auf einen bekannten Prozeßablauf, der einem bekannten Werkstoffzustand und einem bekannten Bearbeitungsergebnis entspricht, Bezug nimmt.

Auch ist für die Erfindung kennzeichnend, daß sowohl besagte Analyse als auch besagte Steuerung in beliebig kurzen Zeitabschnitten, jeweils wechselnd, von Prozeßbeginn bis zu Prozeßende durchgeführt wird und damit alle Forderungen zum Aufbau eines geschlossenen Regelkreises erfüllt sind.

Weiterhin ist Gegenstand der Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Die nachstehende Beschreibung eines Ausführungsbeispiels der Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens dient im Zusammenhang mit beiliegenden Zeichnungen Fig. 1 bis 5 der weiteren Erläuterung.

Mit dem Bezugszeichen 3 ist ein Körper bezeichnet, der mit Hilfe einer Induktionsschleife 5 insgesamt oder in Teilbereichen auf Austenitisierungstemperatur gebracht wird, um z.B. anschließend abgeschreckt bzw. gehärtet zu werden. Zu diesem Zweck wird die Induktionsschleife 5 von einem Frequenzwandler 4 mit elektrischer Energie beliebiger Frequenz versorgt. Versorgungsstrom

und Versorgungsspannung werden mit Hilfe des Spannungswandlers 1 bzw. des Stromwandlers 2 gemessen. Die entsprechenden Meßsignale werden von einem mehrkanaligen Meßwandler 6 aufgenommen und zur weiteren Verarbeitung zu einem der jeweils von der Heizschleife 5 verbrauchten Leistung P proportionalen Signal an den Rechner 7 weitergegeben. Die vom Rechner 7 errechnete zeitliche Funktion  $P(t)$  ist in ihrem prinzipiellen Verlauf in Fig. 2 dargestellt. Der Rechner 7 analysiert die Funktion  $P(t)$  indem er z.B. deren momentanen Werte mit einer geeigneten, dem jeweiligen Vorgang angepaßten Abfragefrequenz, mit den zeitgleichen Werten einer Referenzfunktion vergleicht, wobei diese Referenzfunktion aus einem Vorrat von Referenzfunktionen  $P_a(t)$  bis  $P_k(t)$  entnommen wird, der vom Speicher des Rechners 7 zur Verfügung gestellt wird.

Die Referenzfunktionen  $P_a(t)$  bis  $P_k(t)$  werden auf einfachste Weise in den dem eigentlichen geregelten Zyklus  $n = i$  vorangehenden Einrichtungszyklen  $n = a$  bis  $k$  empirisch bestimmt, nämlich durch Zeitaufnahme der maßgeblichen Prozeßkenngrößen von Prozesszyklen, die jeweils zu einem befriedigenden Bearbeitungsergebnis geführt haben.

Die Analyse der jeweils aktuellen Funktion  $P_i(t)$  in bezug auf die Referenzfunktion  $P_b(t)$  durch den Rechner 7 beginnt, wie in Fig. 2 dargestellt, im Zeitpunkt  $t = 0$  und wird im angegebenen Beispiel bis zum Zeitpunkt  $t = t_2(i) < t_e$  fortgeführt.

Ziel dieser Analyse ist erfindungsgemäß, aufgrund bestimmter Kriterien charakteristische Unterschiede im Verlauf der beiden Funktionen  $P_i(t)$  und  $P_b(t)$  zu erkennen und diese bestimmten, den Prozeß der induktiven Wärmebehandlung beeinflussenden Faktoren zuzuordnen, z.B. Änderung der Härtebarkeitseigenschaften des erhitzten Werkstoffes, Änderung des Induktorzustandes u.ä..

Im folgenden wird ein Beispiel für ein Analyse-kriterium zur Erkennung veränderter Härtebarkeitseigenschaften beschrieben.

Der Rechner 7 ermittelt für vorgegebene Kontrollwerte  $P_{1u}$  und  $P_{2u}$  die zugeordneten Zeiten  $t_1(b)$  und  $t_2(b)$  für den gewählten Referenzzyklus  $n = b$  und die zugeordneten Zeiten  $t_1(i)$  und  $t_2(i)$  für den aktuellen, in Echtzeit zu korrigierenden Zyklus  $n = i$  (Fig. 2).

Anschließend errechnet der Rechner 7 den Betrag des Ausdrucks

$$(1) \quad \Delta(i) = (((t_2(i) - t_2(b)) - (t_1(i) - t_1(b))))$$

Führt die Rechnung (1) zu einem Ergebnis

$$(2) \quad \Delta(i) \neq 0,$$

bedeutet dies, daß das im Zyklus  $n = i$  induktiv erwärmte Werkstück gegenüber dem im Zyklus  $n$

=  $b$  erwärmten Werkstück abweichende Werkstoffeigenschaften bzw. Härtebarkeitseigenschaften aufweist. Letzteres bedeutet dann weiter, daß im Falle eines unkorrigierten weiteren Prozeßablaufes, das Härteergebnis wegen der festgestellten Abweichung ausserhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen wird.

Erfindungsgemäß kann letzteres dadurch vermieden werden, daß der Prozeßablauf bzw. der ursprüngliche, d.i. der unverändert aus dem Einrichtungszklus übernommene Betrag der Stellgröße  $S(i)$  ab dem Zeitpunkt  $t_2(i)$ , um den Betrag  $\Delta S(i)$  korrigiert wird, Fig. 3.

Den Korrekturbetrag  $\Delta S(i)$  errechnet der Rechner 7 aus einer Bestimmungsgleichung der Form

$$(3) \quad \Delta S(i) = f(\Delta(i)).$$

Ein entsprechendes Korrektursignal wird vom Rechner 7 über die Steuerung 8 an den Frequenzwandler 4 weitergeleitet, nämlich dergestalt, daß die den Prozeßablauf bestimmende Kenngröße ab dem Zeitpunkt  $t_2(i)$  gegenüber einer unkorrigierten Situation  $P(i)$  nun verändert gemäß  $P(\text{korrig. } i)$  verläuft und damit trotz der zufällig aufgetretenen Abweichung der Werkstoffeigenschaften, das Härteergebnis erfindungsgemäß in den vorgegebenen Toleranzen gehalten wird.

Die Bestimmungsgleichung (3) berücksichtigt die spezifischen metallurgischen, thermischen und geometrischen Bedingungen eines gegebenen Anwendungsfalles.

Auf einfache Weise läßt sich die Bestimmungsgleichung (3) auf empirischem Wege ermitteln. Dazu kann z.B. der einfache Ansatz

$$(4) \quad \Delta S(i) = g \cdot \Delta(i) / t_2(i)$$

gewählt werden. Darin bedeutet  $g$  eine Größe, die empirisch bestimmt wird und die von der Höhe der werkstoffbedingten Abweichung des Härteergebnisses eines unkorrigierten Zyklus  $n = u$  gegenüber dem Härteergebnis des Referenzzyklus  $n = b$  abhängt. Wird als Härteergebnis beispielweise die Randhärte  $R_{ht}$  verstanden, entspricht die Abweichung der Härteergebnisse der Differenz

$$(5) \quad \Delta R_{ht}(u) = R_{ht}(b) - R_{ht}(u).$$

Darin bedeuten:  $R_{ht}(b)$  - die erwünschte und im Referenzzyklus  $n = b$  erzielte Randhärte;  $R_{ht}(u)$  - die im unkorrigierten Zyklus  $n = u$  erzielte, wegen veränderter Härtebarkeitseigenschaften jedoch vom erwünschten Wert abweichende Randhärte.

In einem oder mehreren Anpassungsschritten bzw. mit Hilfe einer entsprechenden Anzahl von

Versuchshärtungen und unter Ermittlung des jeweiligen Betrages des Ausdrucks (1) sowie unter Durchführung einer Korrektur des Prozeßablaufes in der beschriebenen Weise, wird nun  $g$  im Ansatz (4) sukzessive so verändert, daß der Differenzbetrag (5) gegen Null strebt. Der auf diese Weise empirisch ermittelte Wert von  $g$ , wird dann in die zur werkstoffabhängigen Prozeßregelung bzw. Prozeßkorrektur in der Serienfertigung verwendete Beziehung (4) übernommen.

Ein weiteres Beispiel für ein Kriterium zur Erkennung eines charakteristischen Unterschiedes zwischen den Funktionen  $P_i(t)$  und  $P_b(t)$ , das erfindungsgemäß für eine Prozeßregelung in Echtzeit verwendet werden kann, ist die Berechnung des Verhältnisses (Fig. 4)

$$(6) \quad \text{Kappa}(i) = \Delta P(b) / \Delta P(i).$$

durch den Rechner 7. Führt das Ergebnis der Rechnung (6) zu

$$(7) \quad \text{Kappa}(i) \neq 1,$$

bedeutet dies, wie im Zusammenhang mit (2) schon erläutert, daß das im Zyklus  $n = i$  erwärmte Werkstück gegenüber dem im Zyklus  $n = b$  erwärmten, abweichende Werkstoffeigenschaften aufweist.

Analog zur Vorgangsweise, die im Zusammenhang mit der Verwendung des Kriteriums (1) beschrieben wurde, wird der ermittelte Betrag (7) mit Hilfe einer neuen Bestimmungsgleichung

$$(8) \quad \Delta S(i) = k \cdot (1 - \text{Kappa}(i))$$

zur Berechnung der Korrektur der Stellgröße  $S(i)$  verwendet (Fig. 3). Die Größe  $k$  wird auf gleichem Wege bestimmt, wie für  $g$  schon beschrieben.

Kennzeichnend für den Erfindungsgedanken ist, daß sowohl die beschriebenen beiden Analysen als auch weitere Möglichkeiten bzw. Kriterien, die den Werkstoffeinfluß bereinigt von anderen Einflüssen erfassen, zur Erkennung charakteristischer Unterschiede zwischen einer Referenzfunktion und einer aktuellen Funktion geeignet sind.

Für den Erfindungsgedanken ist darüber hinaus kennzeichnend, daß die analysierten Funktionen  $P_b(t)$  und  $P_i(t)$  stellvertretend und jeweils wahlweise, für den zeitlichen Verlauf einer oder mehrerer der genannten elektrischen Kenngrößen  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  oder  $f$  stehen.

Erfindungsgemäß ist es von Vorteil, wenn die vergleichende Analyse parallel mehrere der genannten elektrischen Kenngrößen erfaßt. Dadurch ist es nämlich möglich den Erfindungsgedanken auszuweiten.

So ist es zum Beispiel für den Fall, daß die analysierte Funktion  $P_i(t)$  bzw.  $P_b(t)$  den zeitlichen Verlauf der Erwärmungsleistung darstellt allgemein bekannt und physikalisch leicht begründbar, daß dann der Verlauf der Funktion  $P_i(t)$  sich gegenüber von  $P_b(t)$  auch unter dem Einfluß einer möglicher Weise zwischen den Zyklen  $n = b$  und  $n = i$  eingetretenen Veränderung des Induktorzustandes ändert, wobei hier unter Induktorzustand beides, sowohl der Abnutzungsgrad als auch die räumliche Zustellung des Induktors zum Werkstück verstanden wird.

Ein solcher Einfluß berührt erfindungsgemäß und wie oben erläutert, den werkstoffbedingten und den zur Prozeßregelung herangezogenen charakteristischen Unterschied nicht und wird daher von der bisher erwähnten Analyse auch nicht erfaßt. Werden nun hingegen erfindungsgemäß, und wie oben erwähnt, mehrere der genannten elektrischen Kenngrößen gleichzeitig bzw. parallel analysiert, kann auch eine Veränderung des Induktorzustandes erfaßt und für die Prozeßsteuerung genutzt werden.

Ein Beispiel für eine solche zusätzliche Erfassung einer Veränderung des Induktorzustandes wird in Verbindung mit Fig. 5 gegeben.

Eine Kontrollzeit  $t_u$  wird so gewählt, daß der Unterschied

$$(9) \quad \text{Lambda}(i) = (P_i(t_u) - P_b(t_u)) / P_b(t_u),$$

und damit gleichzeitig auch der Werkstoffeinfluß noch vernachlässigbar klein sind. Eine solche Bedingung ist erfahrungsgemäß gegeben, wenn

$$(10) \quad t_u < 0,05 \cdot t_e$$

ist.

Der Rechner 7 ermittelt nun für den Zeitpunkt  $t_u$  die momentanen Werte Paare  $(U_b(t_u), I_b(t_u))$  und  $(U_i(t_u), I_i(t_u))$  und daraus die Verhältnisse

$$(11) \quad Z(b) = U_b(t_u) / I_b(t_u)$$

und

$$(12) \quad Z(i) = U_i(t_u) / I_i(t_u).$$

Die Ausdrücke (11) und (12) stehen bekanntlich für die Impedanzen der betrachteten elektrischen Lasten, in diesem Fall der Systeme Induktor/Werkstück in den Zyklen  $n = b$  und  $n = i$ .

Aus dem Betrag

$$(13) \quad \text{Zeta}(i) = (Z(i) - Z(b)) / Z(b)$$

läßt sich quantitativ und vom Werkstoffeinfluß bereinigt, die Veränderung des Induktorzustandes er-

fassen und für eine eventuell erforderliche Korrektur der Stellgröße  $S(i)$  verwenden.

Eine solche Korrektur  $\Delta S(i)$ , Fig. 3, wird prinzipiell in gleicher Weise durchgeführt, wie im Zusammenhang mit (4) und (8) schon erläutert, allerdings schon am Anfang des kontrollierten Zyklus und erheblich vor den entsprechenden Zeitpunkten  $t_1(b)$  bzw.  $t_1(i)$  in Fig. 2, nämlich zum Zeitpunkt

$$(14) \quad t_u \ll t_1(b).$$

## Patentansprüche

1. Verfahren zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen bei induktiver Erwärmung in einem geschlossenen Regelkreis, wenn bei sonst vorgegebenen und genau reproduzierten Maschinenparametern eines induktiven Erwärmungsaggregats das Bearbeitungsergebnis von einer Zufallsänderung unterliegenden Werkstoffeigenschaften beeinflusst wird beispielsweise durch zufällige Veränderung des metallurgischen Umwandlungsverhaltens, der elektrischen oder magnetischen Eigenschaften und ähnliches, dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Verlauf der maßgeblichen Prozeßkenngröße(n), wie z.B. Temperatur, Leistung  $P$ , Spannung  $U$ , Strom  $I$ , Phasenwinkel  $\phi$ , Frequenz  $f$  u. ä. in Echtzeit, d. h. mit Prozeßbeginn einsetzend, in bezug auf Abweichungen gegenüber einer vorgegebenen Funktion bzw. Referenzfunktion  $P_b(t)$  analysiert wird, man durch Zufallsänderung von Werkstoffeigenschaften bedingte Abweichungen betragsmäßig feststellt und diese nicht gegensteuernd gegen Null streben läßt, sondern aus den Abweichungen mit Hilfe bestimmter Analyse Kriterien charakteristische Unterschiede erkennt und diese der Änderung von Werkstoffeigenschaften, z. B. der Änderung von Härtebarkeits-eigenschaften, zuordnet, aufgrund der erkannten Unterschiede einen Korrekturbetrag errechnet, die ursprünglichen Stellgrößen um den Korrekturbetrag im noch laufenden Arbeitszyklus ab einem Zeitpunkt noch vor Zyklusende korrigiert, dergestalt, daß die zufällige Veränderung der Werkstoffeigenschaften jeweils kompensiert und deren Einfluß auf das Behandlungsergebnis eingeschränkt wird, wobei im einzelnen
  - a) - besagte Referenzfunktion  $P_b(t)$  empirisch bestimmt wird, nämlich durch Zeitaufnahme der maßgeblichen Prozeßkenngrößen in einem dem eigentlichen, zu regelnden Zyklus vorangehenden Einrichtzyklus, mit Stellgröße, die zu einem befriedigenden

Bearbeitungsergebnis führt,

b) - der Prozeß im aktuell laufenden Zyklus - bis zu einem Zeitpunkt, der noch beträchtlich vor Zyklusende liegt - mit einer aus besagtem Einrichtzyklus ursprünglichen Stellgröße abläuft und durch Zeitaufnahme der maßgeblichen Kenngrößen die aktuelle Funktion  $P_i(t)$  ergibt,

c) - besagte Analyse zur Erkennung charakteristischer Unterschiede der jeweils aktuellen Funktion  $P_i(t)$  in bezug auf die Referenzfunktion  $P_b(t)$  im jeweils aktuellen Zyklus zum Zeitpunkt Null beginnt und bis zu besagten Zeitpunkt vor Zyklusende fortgeführt wird und in Abhängigkeit von der Höhe der errechneten Unterschiede mit Hilfe einer empirischen Bestimmungsgleichung einen Korrekturbetrag der ursprünglicher Stellgröße berechnet,

d) - die besagtem Korrekturbetrag zugrundeliegende Bestimmungsgleichung spezifische metallurgische, elektrische und geometrische Bedingungen des gegebenen Anwendungsfalles berücksichtigt und empirisch ermittelt werden kann,

e) - der Prozeßablauf im aktuellen Zyklus, ab besagtem Zeitpunkt vor Zyklusende, mit um besagten Korrekturbetrag korrigierter Stellgröße abläuft und damit trotz der zufällig aufgetretenen Abweichung der Werkstoffeigenschaften, das Härteergebnis - aufgrund des empirisch bestimmten Korrekturbetrages - in den vorgegebenen Toleranzen hält.

f) - die analysierten Funktionen  $P_b(t)$  und  $P_i(t)$  stellvertretend und jeweils wahlweise für den zeitlichen Verlauf einer oder mehrerer der besagten elektrischen Prozeßkenngrößen  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  oder  $f$  stehen.

2. Vorrichtung zur Durchführung eines werkstoffabhängig gesteuerten Wärmebehandlungsprozesses eines Werkstücks (3) aus Metall, zusammengesetzt aus Meßwandlern (1, 2) zur Messung der Wärmebehandlungsprozeßkenngrößen Leistung  $P$ , Spannung  $U$ , Strom  $I$ , Phasenwinkel  $\phi$  und Frequenz  $f$ , einem zur Erwärmung des Werkstücks (3) dienenden Frequenzwandler (4) bzw. Induktors (5), einem mehrkanaligen Signalwandler (6), einem Rechner (7) und einer Steuerung (8), die die Energieabgabe des Frequenzwandlers (4) bzw. Induktors (5) an das Werkstück (3) steuert, wobei der Rechner (7) der Steuerung (8) einen aus einem vorangehenden Einrichtzyklus ursprünglichen Stellwert eingibt, den über die Dauer eines ersten Teilabschnittes des Erwärmungszyklus unverändert beibehält, während dieses Teilab-

schnittes den zeitlichen Verlauf besagter Prozeßkenngrößen aufnimmt, diesen zeitlichen Verlauf mit vorgegebenen Referenzfunktionen vergleicht, eventuelle charakteristische Unterschiede errechnet, solche Unterschiede aufgrund bestimmter Analysekriterien als zufallsartig aufgetretene Änderung der Werkstoffeigenschaften gegenüber denen, die der Referenzfunktion zugrunde lagen, erkennt und als unerwünschten Werkstoffeinfluß auf das Behandlungsergebnis wertet, in Abhängigkeit von der Höhe der errechneten Unterschiede und zur Kompensation des Werkstoffeinflusses einen Korrekturbetrag des ursprünglichen, bisher beibehaltenen Stellwerts berechnet und - genau nach Ablauf besagten ersten Teilabschnittes des Erwärmungszyklus - den korrigierten Stellwert der Steuerung (8) eingibt, dergestalt, daß der Erwärmungszyklus im verbleibenden zweiten Teilabschnitt - bis zu einer Beendigung - nun unter Beibehaltung des korrigierten Stellwerts abläuft und dementsprechend bewirkt, daß das auf das Werkstück (3) bezogene Wärmebehandlungsergebnis trotz unvorhergesehener und zufällig veränderter Werkstoffeigenschaften den vorgegebenen Vorschriften entspricht.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die genannten Komponenten (1 - 8) gemäß dem bekannten Prinzip eines geschlossenen Regelkreises miteinander verknüpft sind. 30
4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der genannte Regelkreis unmittelbar auch das individuelle, möglicherweise sich zufallsartig verändernde Behandlungsverhalten des Werkstückes (3) enthält. 35
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 - 4, dadurch gekennzeichnet, daß der jeweils charakteristische, werkstoffbeeinflusste zeitliche Verlauf der interessierenden Prozeßkenngrößen Leistung P, Spannung U, Strom I, Phasenwinkel  $\phi$  oder Frequenz f, mit Hilfe des Rechners (7) aufgrund bestimmter Kriterien erfaßt und beurteilt werden kann, z.B. durch Vergleich mit Referenzfunktionen, die mit Hilfe vorangehender Einrichtzyklen gewonnen werden und/oder aus der technischen Lehre entnommene Gesetzmäßigkeiten darstellen. 40

#### Claims

1. Method for material-dependent control in heat treatment processes of metal, with inductive heating in a closed loop, if the processing

result was influenced by material properties, subject to random modifications with otherwise given and exactly consistent machine parameters, such as random alterations in the metallurgic transformation, in the electric and magnetic features, and the like, characterized by the analysis of the chronological sequence of the pertinent process parameter(s) like temperature, capacity P, voltage U, current I, phase angle  $\phi$ , frequency f, and the like, in real time, i.e. beginning with the start of process, related to deviations in comparison with a given function and/or reference function  $P_b(t)$ , if deviations due to random changes in material properties were determined by magnitude and those are not approaching zero, but recognizes characteristic differences from these deviations applying certain analyzing criteria, and assigns those to the modified properties of the material, e.g. a change in hardenability features, calculates the correcting element from the detected difference, adjusts the original correcting variables during the current working cycle and before the end of cycle, such as to compensate the random change of material characteristics and to limit their effect to the process outcome, at which in particular

- a) - said reference function  $P_b(t)$  is determined empirically, namely by timing the relevant process parameters during the setting cycle which precedes the actual controllable cycle, with a correcting variable leading to a satisfactory result of processing,
- b) - the process continues with the actually running cycle to a time considerably ahead of the cycle termination using one of the initial correcting variables from said setting cycle, and generates the actual function  $P_i(t)$  from timing the relevant parameters,
- c) - said analysis to identify distinguishing differences in the actual function  $P_i(t)$  relating to the reference function  $P_b(t)$  commences within the actual cycle at zero, continues to said time prior to the termination of the cycle, and computes a correcting magnitude of the original correcting variable by using an empiric conditional equation interdependent on the size of the computed difference,
- d) - the conditional equation taken as a basis for said correcting magnitude regards specific metallurgic, electric and geometric conditions of the given application and is determined empirically,
- e) - the process sequence of the actual cycle continues with a variable corrected in compliance with said correcting magnitude,

from the point of time preceding the termination of the cycle, and keeps the hardening result within the given tolerances, in spite of random deviations in the material properties - based on the empirically determined correcting element - ,

f) - the analyzed functions  $P_b(t)$  and  $P_i(t)$  are representative and optional for the chronological progress with one or more of said electric process parameters  $P$ ,  $U$ ,  $I$ , or  $f$ .

2. Appliance to execute a material -dependent, controlled heat treatment process with a workpiece (3) made of metal, consisting of the transducers (1, 2) to measure the heat treatment process parameters like capacity  $P$ , voltage  $U$ , current  $I$ , phase angle  $\phi$  and frequency  $f$ , the frequency converter (4) and/or inductor (5) used to heat the workpiece (3), the multi-channel transducer (6), the computer (7) and a control system (8) to actuate the delivery of power from the frequency converter (4) and/or inductor (5) to the workpiece (3), at which the computer (7) feeds the control system (8) with an initial variable from a preceding setting cycle, constantly adheres to this variable for the duration of the first section of the heating cycle, incorporates the chronological progress of said process parameters during this section, compares the chronological progress with the given reference function, computes possible characteristic differences, recognises such differences as random changes in the material properties in comparison with the basic reference functions, applying certain analyzing criteria, and evaluates same as an undesired effect to the processing result, subsequently computes the correcting factor of the previous variable dependent on the size of difference and to compensate the effect on the material, and - right after the completion of said first section of the heating cycle-feeds the control system (8) with the corrected variable, in such a manner that the second heating cycle - until completion - proceeds with the corrected variable and correspondingly leads to a heat treatment result for the workpiece (3) which is in compliance with the given standards, in spite of unforeseen and randomly changed material properties.
3. Appliance in accordance with demand 2, characterized by the linkage of mentioned components (1 - 8) in compliance with the known principle of closed control loops.

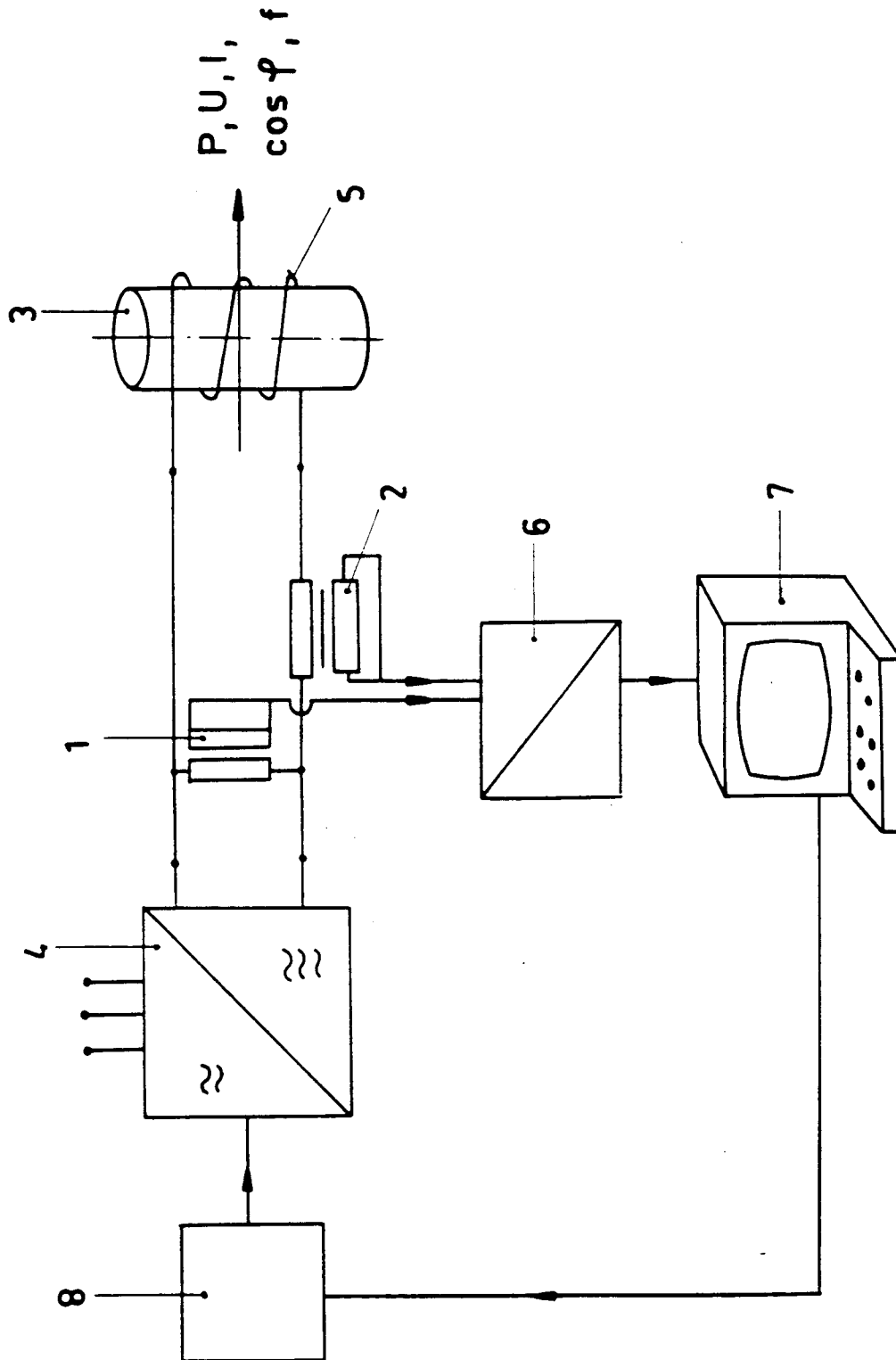
4. Appliance in accordance with demand 2 or 3, characterized by the integration or the individual, possibly and randomly changing behavior of the workpiece (3) in the mentioned control loop.

5. Appliance in accordance with one of the demands 2 to 4, characterized by the fact that the particular, material-dependent chronological progress of the applicable process parameters like capacity  $P$ , voltage  $U$ , current  $I$ , phase angle  $\phi$  or frequency  $f$ , are picked up and evaluated in the computer (7), on the basis of certain criteria e.g. comparison with reference functions gained from preceding setting cycles and/or from the regularities stipulated in the engineering science.

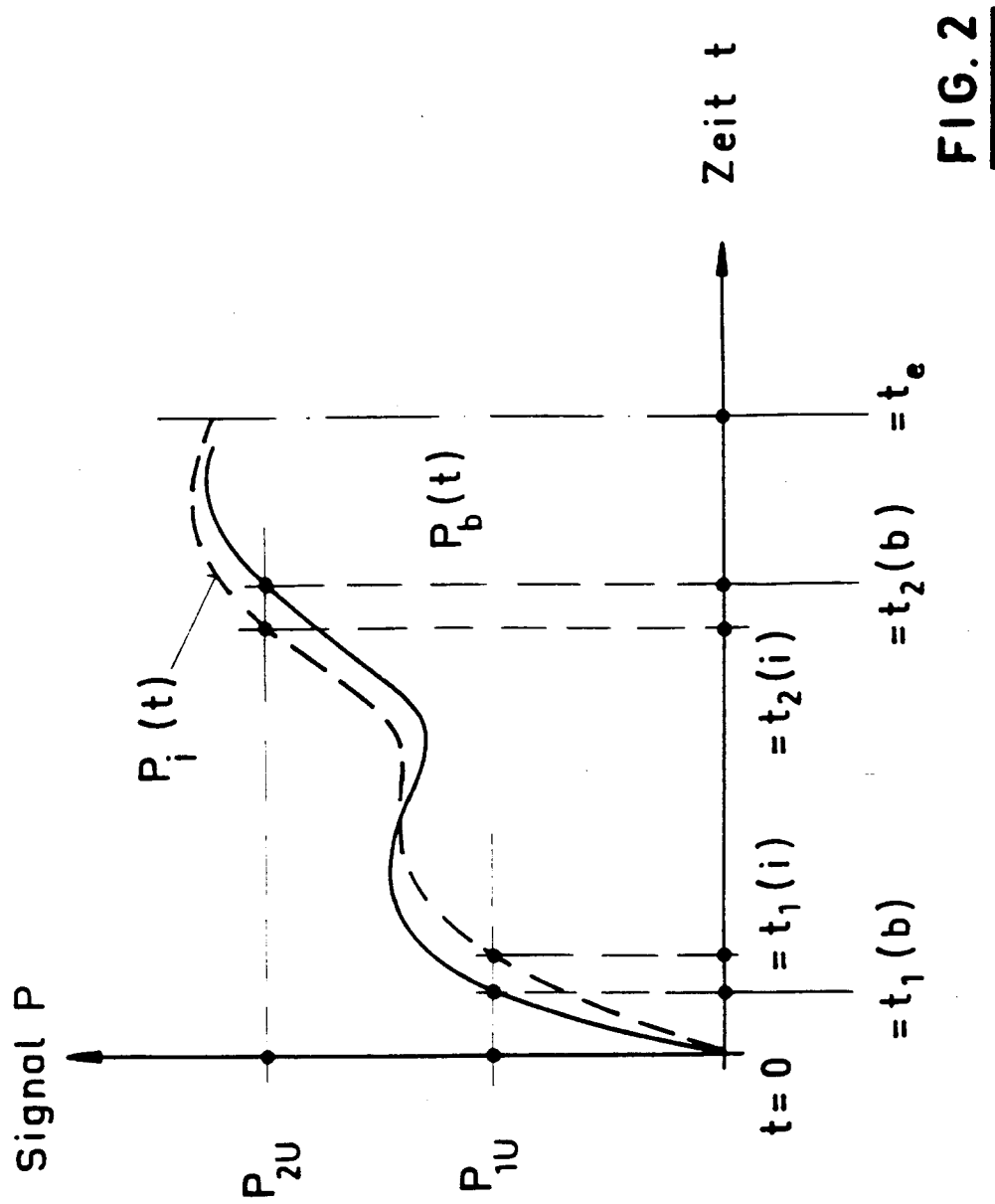
### Revendications

1. Procédé de régulation d'opération de traitement thermique des métaux par échauffement par induction en fonction du matériau dans un circuit régulateur fermé lorsque, dans le cas de paramètres de machine prédéfinis et exactement reproductibles d'un agrégat d'échauffement par induction, les résultats du traitement sont influencés par une modification fortuite des propriétés du matériau, par exemple par une modification fortuite du comportement de transformation du métal, des propriétés électriques ou magnétiques ou analogues, caractérisé par la variation temporelle des grandeurs caractéristiques prépondérantes telle que la température, puissance  $P$ , tension  $U$ , courant  $I$ , angle de phase  $\phi$ , fréquence  $f$  et autres en temps réel, c'est à dire dès le commencement du processus dont les écarts sont analysés par rapport à une fonction prédéfinie ou une fonction de référence  $P_b(t)$ , on constate des écarts chiffrés causes par des modifications fortuites des propriétés du matériau qu'on ne cherche pas à ramener à zéro, mais on recherche dans ces écarts, à l'aide de critères analytiques, des différences caractéristiques, on les attribue aux modifications des propriétés du matériau, par exemple à la modification des propriétés de durcissement, calcule une valeur de correction d'après les différences enregistrées, corrige les valeurs de réglages initiales en fonction de la valeur de correction pendant le déroulement du cycle à un moment situé avant la fin du cycle de telle façon que chaque modification fortuite des propriétés du matériau est compensée et que son influence sur le résultat du traitement est limitée, ce qui amène en détail
  - a) la fonction de référence  $P_b(t)$  citée plus haut est déterminée de façon empirique,

- c'est à dire par anregistrement par rapport au temps des grandeurs caractéristiques prépondérantes dans un cycle d'installation précédant le cycle effectivement à régler avec une valeur de réglage conduisant a un résultat de traitement satisfaisant, 5
- b) le processus dans le cycle actuellement en cours se déroule - jusqu'à un moment situé nettement avant la fin du cycle - avec une valeur de réglage fournie par le cycle d'installation cité plus haut et donne la fonction actuelle  $P_i(t)$  par enregistrement par rapport au temps des grandeurs prépondérantes, 10
- c) l'analyse citée plus haut pour identifier les différences. caractéristiques de chaque fonction  $P_i(t)$  actuelle par rapport à la fonction de référence  $P_b(t)$  dans chaque cycle actuel commence au point zéro et se poursuit jusqu'au moment cité plus haut avant la fin du cycle et, en fonction de l'importance des écarts obtenus, calcule une valeur de correction de la valeur de réglage initiale à l'aide d'une équation de définition empirique, 15 20 25
- d) l'équation de définition fournissant la valeur de correction cités plus haut tient compte des conditions métalliques, électriques et géométriques spécifiques du cas d'application envisagé et peut être déduite de façon empirique, 30
- e) le processus se déroule dans le cycle actuel, à partir du moment cité avant la fin du cycle, avec une valeur d'installation corrigée par la valeur de correction citée plus haut et ainsi, en dépit de l'écart fortuit des propriétés du matériau pouvant se produire, maintient le durcissement - grâce à la valeur de correction déterminée de façon empirique - dans une marge de tolérance voulue. 35 40
- f) les fonctions analysées  $P_b(t)$  et  $P_i(t)$  sont représentatives ou applicables respectivement au choix pour la variation temporelle d'une ou plusieurs des grandeurs caractéristiques électriques  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  ou  $f$  citées plus haut. 45
2. Dispositif pour l'exécution d'une opération de régulation de traitement thermique en fonction du matériau d'une pièce à usiner (3) en métal, composé d'un transformateur de mesure (1,2) pour mesurer les grandeurs de traitement thermique puissance  $P$ , tension  $U$ , courant  $I$ , angle de phase  $\phi$  et fréquence  $f$ , d'un transformateur de fréquence (4) ou inducteur (5) servant à l'échauffement de la pièce à usiner (3), d'un transformateur de signaux multicanaux (6), 50 55
- d'un ordinateur (7) et d'une commande (8) qui règle l'apport d'énergie du transformateur de fréquence (4) ou inducteur (5) à la pièce à usiner, ce en quoi l'ordinateur (7) communique à la commande (8) une valeur initiale de réglage obtenue à partir d'un cycle d'installation précédent et la conserve intacte pendant la première partie du cycle d'échauffement, enregistre la variation temporelle des grandeurs caractéristiques pendant cette partie de cycle, compare cette variation temporelle aux fonctions de référence prédéfinies, calcule d'éventuelles différences caractéristiques, reconnaît ces différences en fonction de certains critères d'analyse en tant que modification fortuite des propriétés du matériau par rapport à la fonction de référence et les analyse en tant qu'influence indésirable sur le résultat du traitement, calcule une valeur de correction de la valeur de réglage jusqu'ici conservée, on relation avec l'importance des différences mesurées et pour compenser l'influence de la pièce, et - immédiatement après la fin de la première partie du cycle d'échauffement- communique la valeur de réglage corrigée à la commande (8), de telle manière que le cycle d'échauffement se déroule dans la suite de la deuxième partie - jusqu'à la fin - en fonction de la valeur de réglage corrigée et fasse en sorte que le traitement thermique appliqué à la pièce usinée (3) corresponde aux prescriptions voulues en dépit des modifications aléatoires et imprévisibles des propriétés du matériau.
3. Dispositif correspondant au critère 2, défini par le fait que les composants cités (1-8) sont reliés ensemble conformément au principe connu d'un circuit régulateur fermé.
4. Dispositif correspondant au critère 2 ou 3, défini par le fait que le circuit régulateur fermé intègre également directement la caractéristique individuelle de comportement au traitement de la pièce à usiner (3), susceptible de se modifier de façon imprévisible.
5. Dispositif correspondant à l'un des critères 2 - 4, défini par le fait que chaque variation temporelle caractéristique des grandeurs concernées, puissance  $P$ , tension  $U$ , courant  $I$ , angle de phase  $\phi$  ou fréquence  $f$  influencé par le matériau, peut être appréhendée et estimée par l'ordinateur en fonction de critères précis, par exemple par comparaison avec les fonctions de référence établies à partir de cycles d'installation précédents et/ou légitimée par des théories techniques.

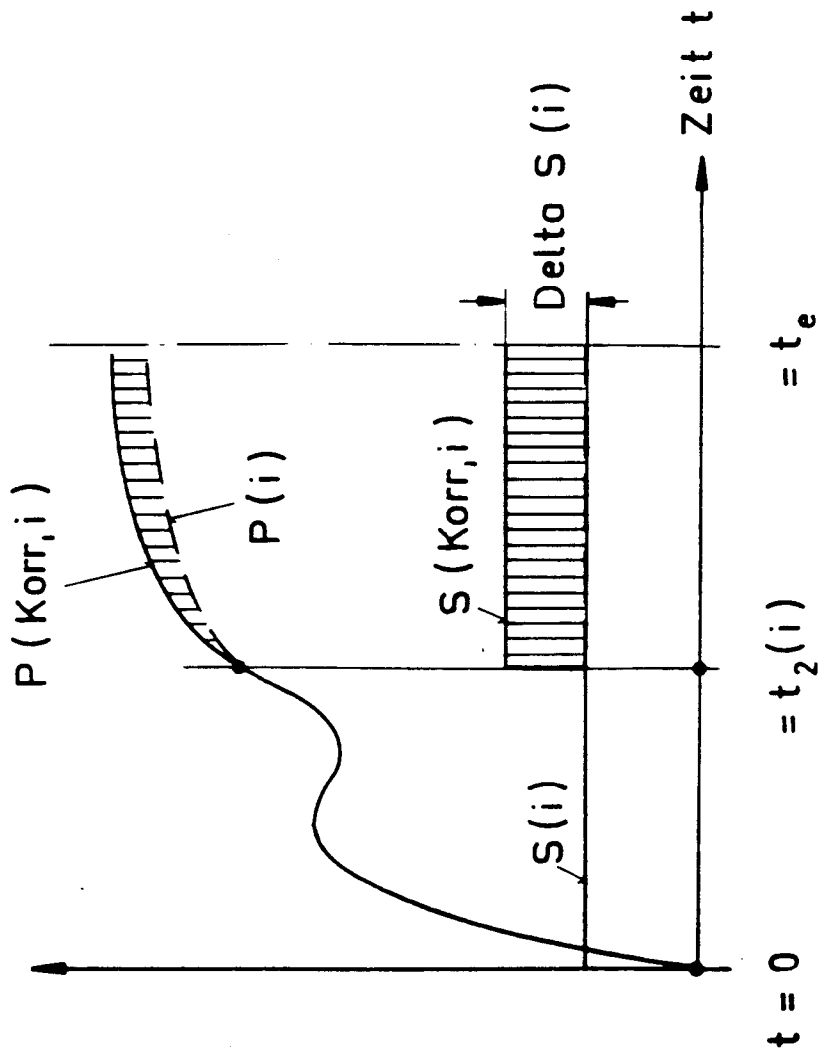


**FIG. 1**

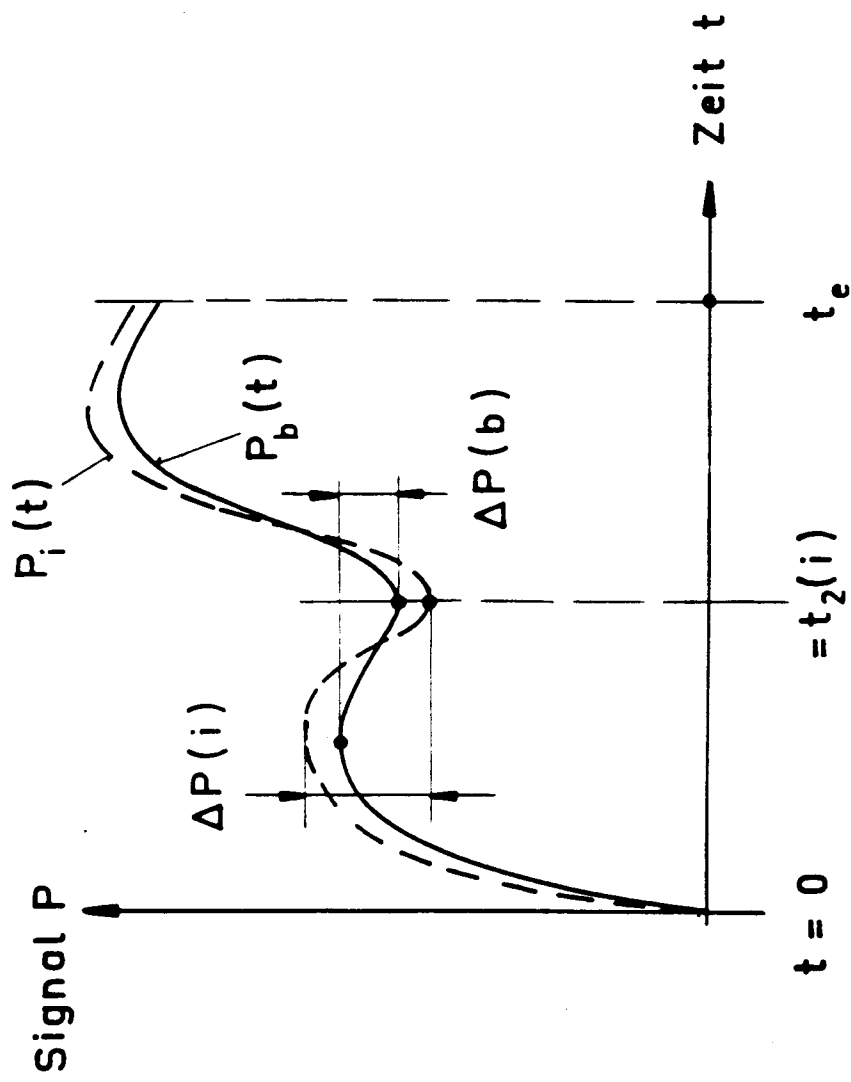


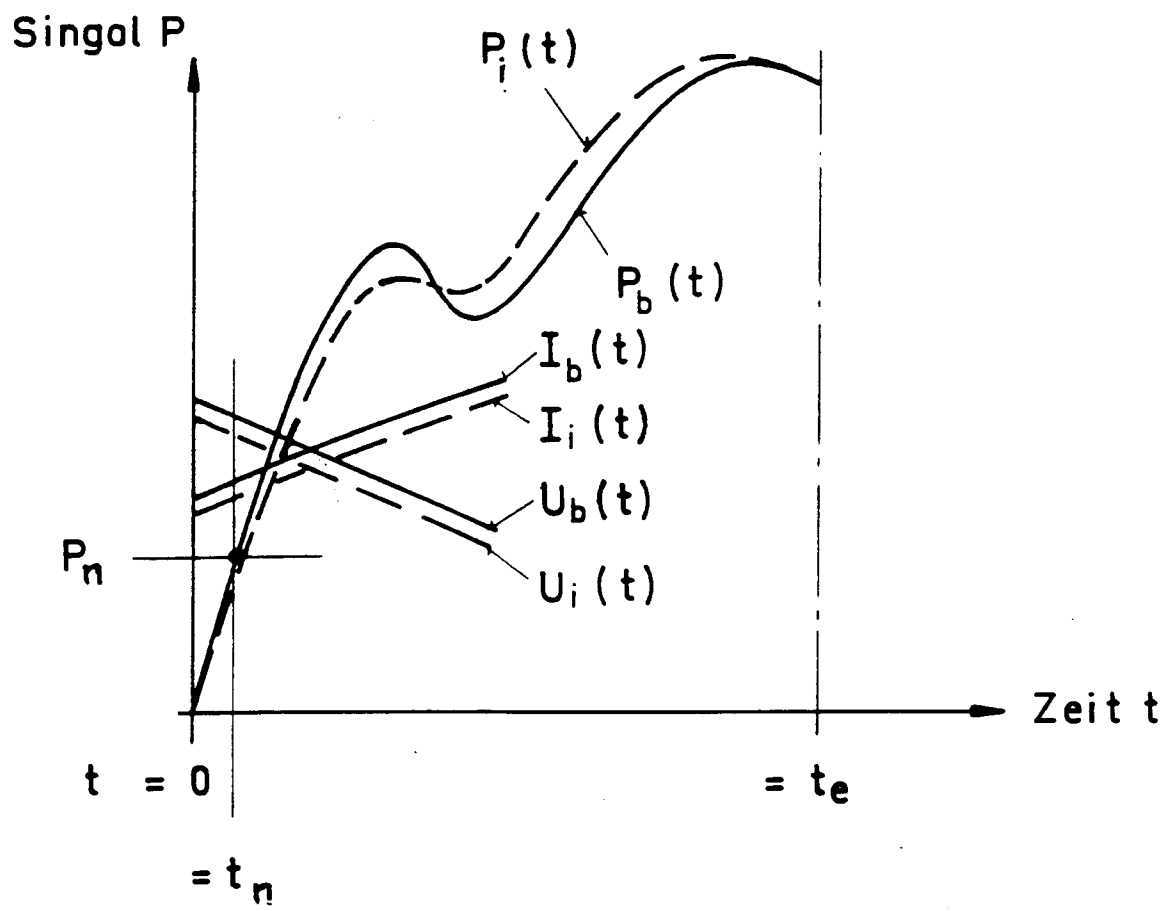
**FIG. 2**

Signal P  
Stellgröße S



**FIG. 3**

FIG. 4

**FIG.5**