



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 00 916 T2** 2006.07.20

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 381 109 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H01P 1/195** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 00 916.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 291 615.7**

(96) Europäischer Anmeldetag: **01.07.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **14.01.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **29.06.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.07.2006**

(30) Unionspriorität:

0208195 01.07.2002 FR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT

(73) Patentinhaber:

**Office National d'Etudes et de Recherches
Aérospatiales, O.N.E.R.A.,
Châtillon-sous-Bagneux, Hauts-de-Seine, FR;
Centre National d'Etudes Spatiales, Paris, FR**

(72) Erfinder:

**Chan, Bernard, 31650 Lauzerville, FR; Dirassen,
Bernard, 31650 Saint Orens de Gameville, FR;
Albert, Isabelle, 31750 Escalquens, FR; Lopez,
Jean-Marc, 31450 Corronsac, FR**

(74) Vertreter:

Samson & Partner, Patentanwälte, 80538 München

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Regelung von Ferritphasenschieberelementen, Vorrichtungen zur Durchführung des Verfahrens und zugehörige Anwendungen**

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).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Höchstfrequenz-Ferrittoroid-Phasenschieber, die in den Radaren, den Richtfunkverbindungen und den Telekommunikationssystemen verwendet werden, insbesondere für die Gruppenantennen, die die Funktion von Antennen mit elektronischer Abtastung erfüllen können, sowie für die variablen Leistungsschalter und -teiler, die diesen Phasenschiebertyp verwenden.

[0002] Unter den verschiedenen bekannten Ferrit-Phasenschiebern weisen die Einzeltoroid- oder Doppeltoroid-Phasenschieber die folgenden Vorteile auf:

- miniaturisierter, kompakter Aufbau, dessen Abmessung kompatibel mit der Vernetzung einer Gruppenantenne mit elektronischer Abtastung einer oder zweier Ebenen ist;
- geringe Einfügungsverluste;
- Remanenz-Funktionsweise ("Latching Ferrite Phase Shifter"): Die Steuerenergie muß während der Dauer, während der die Phasenverschiebung notwendig ist, nicht aufrechterhalten werden;
- geringer Steuerenergieverbrauch und Einfachheit der Steuerung; die Steuerung ist pulsartig, es ist daher nicht erforderlich, einen kontinuierlichen Strom aufrechtzuerhalten;
- sehr geringe Schaltzeiten, in der Größenordnung von einigen Mikrosekunden, mit einer relativ einfachen und klassischen Steuerelektronik;
- großer Wirkungsgrad der Phasenverschiebung pro Längeneinheit (in Grad/cm);
- geringe frequenzabhängige Dispersion: für eine gegebene Steuerenergie variiert die Verzögerung extrem wenig abhängig von der Frequenz.

[0003] All diese Qualitäten sind im allgemeinen in einer Antennenanwendung mit elektronischer Abtastung gesucht. Der einzig negative Punkt, der im übrigen alle Ferrit-Vorrichtungen betrifft, ist das Temperaturverhalten dieser Phasenschieber. Tatsächlich variiert die erhaltene Phasenverschiebung abhängig von der Arbeitstemperatur des Phasenschiebers, obgleich für diesen Phasenschiebertyp (mit Einzel- oder Doppeltoroid) mit Remanenz-Funktionsweise die Temperaturempfindlichkeit bereits geringer ist als für andere Ferrit-Phasenschieberstrukturen (insbesondere die reziproken Phasenschieber vom Typ Reggia & Spencer).

[0004] In den [Fig. 1–Fig. 4](#) der Zeichnung sind schematische Darstellungen von Einzelferrittoroid- und Doppelferrittoroid-Phasenschiebern dargestellt:

[0005] Die [Fig. 1](#) ist eine schematische Darstellung eines Einzeltoroid-Phasenschiebers;

[0006] Die [Fig. 2](#) ist eine schematische Darstellung eines Doppeltoroid-Phasenschiebers;

[0007] Die [Fig. 3](#) ist eine schematische Darstellung eines kompakten Aufbaus eines Doppeltoroid-Phasenschiebers;

[0008] Die [Fig. 4](#) ist eine schematische Darstellung eines Mischaufbaus mit Steuerelektronik, identisch zum kompakten Aufbau.

[0009] Der Einzeltoroid-Phasenschieber ist aus einem Ferrittoroiden (1) zusammengesetzt, der um ein Dielektrikum (3) herum im Zentrum eines Wellenleiters (2) mit rechteckförmigem Querschnitt für die TE₀₁-Ausbreitungsmoden angeordnet ist. In diesem Fall füllt der Toroid nicht den gesamten Querschnitt des Wellenleiters aus. Dieser Phasenschiebertyp arbeitet mit einer linear polarisierten Welle.

[0010] Der Doppeltoroidaufbau ermöglicht eine bessere Kompaktheit und Miniaturisierung. Er ist aus einem dielektrischen Stück (3) zusammengesetzt, das sich zwischen zwei Ferrittori (1, 1') befindet, wobei die gesamte Anordnung in einem Wellenleiter (2) mit rechteckförmigem Querschnitt angeordnet ist. Die Phasenverschiebung wird durch eine Änderung der Magnetisierung in den beiden Ferrittori erhalten, was somit eine Variation der Ausbreitungskonstante der diesen durchquerenden Höchstfrequenzwelle erzeugt. Die Magnetisierungsänderung wird durch eine Variation des magnetischen Querfeldes erhalten, das seinerseits durch den Durchgang eines Stroms erzeugt wird, der einen elektrischen Draht (nicht dargestellt) durchläuft, der durch die Ferrittoride längs hindurchgeht. Die Form des Ferrittoroiden ermöglicht die Aufrechterhaltung der Magnetisierung auch bei Stromabwesenheit. Dies ist es, was man eine Remanenz-Funktionsweise ("Latching") nennt. Der so erhaltene Phasenschieber ist ein nicht-reziproker Phasenschieber, was bedeutet, daß für eine vorgegebene Stromrichtung die erhaltene Phasenverschiebung unterschiedlich ist, der Ausbreitungsrichtung der Höchstfrequenzwelle folgend.

[0011] Die Empfindlichkeit der Phasenverschiebung dieser Phasenschieber gegenüber Temperatureffekten ist ihr Hauptnachteil in Anwendungen, bei denen die Arbeitstemperatur in einem mehr oder weniger großen Bereich, im allgemeinen von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$, bei Nachrichtenübertragungen oder beim Radar variieren kann. Diese Empfindlichkeit ist auf temperaturabhängige Variationen der Eigenschaften des Ferritmaterials zurückzuführen.

[0012] Zum Beheben dieser Nachteile sind zur Zeit einige Lösungen bekannt:

- Man verwendet ein Ferritmaterial, dessen charakteristischen Größen, die Magnetisierung bei Sättigung ($4\pi M_s$) und die Remanenzmagnetisierung B_r , wenig temperaturabhängig variieren. Leider ist diese Technik jedoch nicht perfekt, da diese Eigenschaften nicht konstant von der Temperatur abhängen. Außerdem variieren bei für Frequenzen größer 10 GHz verwendete Ferritmaterialien, die im allgemeinen Lithium- oder Nickelferrite sind, die Eigenschaften dieser Ferrite auf monotone Weise. Es ist daher keinerlei Kompensation möglich. Tatsächlich gehen die Kompensationstechniken, bei denen die Ferritmaterialien mit Metallen (Aluminium oder Gadolinium) dotiert werden, im allgemeinen mit einer Erhöhung der dielektrischen und magnetischen Verluste einher. Diese Verluste werden für höhere Frequenzen inakzeptabel.
- Man verbindet einen Höchstfrequenzferriten (1) und ein Niederfrequenzferritmaterial (5), das als magnetische Steuerschaltung dient (Fig. 4). Durch Auswählen eines Ferritmaterials mit geeigneten temperaturabhängigen Eigenschaften, wie beispielsweise in US-A-3 824 502 gezeigt, kann man eine gewisse Temperaturkompensation erhalten. Jedoch hat diese Technik enorme Nachteile. Erstens ist der Mischaufbau nicht kompakt, was das Volumen und die Masse erhöht. Diese Technik ergibt zudem Probleme bei der Reproduzierbarkeit in einem industriellen Herstellungsprozeß, da es erforderlich ist, die Abmessung eines Luftspaltes zu beherrschen. Im übrigen erfordert ein Mischtoroid eine stark erhöhte Steuerenergie im Vergleich zu einem kompakten Ferrittoroiden, der einzig aus einem Höchstfrequenzferriten zusammengesetzt ist, dessen Remanenzmagnetisierung natürlicherweise sichergestellt ist. Dies ist dem Vorliegen des Luftspaltes zuzuschreiben.
- Man führt eine Temperaturkorrektur in Echtzeit durch. Somit ist in einer Antennengruppe, die beispielsweise N Phasenschieber umfaßt, jeder Phasenschieber individuell durch seine Temperatur charakterisiert. Die Phasenverschiebungskurven als Funktion der elektronischen Steuerung für verschiedene Temperaturen werden aufgezeichnet und in einem Speicher in einem EPROM abgelegt. Eine Echtzeit-Temperaturmeßsonde gibt zu jedem Zeitpunkt Kenntnis über die effektive Temperatur des Phasenschiebers und läßt daraus das geeignete Steuergesetz zum Erhalt einer konstanten Phasenverschiebung ableiten, abhängig von den gespeicherten Informationen. Diese Technik kann unter der Bedingung zufriedenstellend sein, daß identische Steuergesetze für alle Phasenschieber der Gruppe vorliegen. Im Falle eines Temperaturgradienten inmitten der Gruppenantenne muß jeder Phasenschieber sein eigenes Korrekturgesetz besitzen, was sehr schnell kompliziert und kostenträchtig wird und deshalb die mögliche Korrekturgenauigkeit beschränkt.

[0013] Die Erfindung zielt darauf ab, eine neue Lösung für dieses Problem zu finden, die von den vorstehenden Nachteilen freigemacht und für eine Temperaturspanne von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ geeignet ist.

[0014] Die Erfindung basiert auf der Entdeckung, daß ein Wert der Steuerenergie eines Ferrittoroid-Höchstfrequenz-Phasenschiebers mit Remanenz-Funktionsweise existiert, für den die Phasenverschiebung in etwa temperaturunempfindlich ist, wenigstens im Bereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ liegt, und daß die Änderung der Phasenverschiebung mit der Temperatur für eine vorgegebene Steuerenergie eine steigende Funktion oder eine fallende Funktion der Temperatur ist, je nachdem ob die Steuerenergie geringer oder größer als der vorgenannte Unempfindlichkeitswert ist.

[0015] Nach Bestimmen dieses Unempfindlichkeitspunktes kann daher die Phasenverschiebung vom Einfluß der Temperatur befreit werden, indem der Phasenschieber mit der Steuerenergie gesteuert wird, die seinem Unempfindlichkeitspunkt (erste Lösung) entspricht, oder indem wenigstens zwei identische oder im wesentlichen identische Phasenschieberelemente in Serie geschaltet werden und diese mit unterschiedlichen Steuerenergie gesteuert werden, so daß von den Elementen jeweils das eine Element in einem Bereich, in dem die Phasenverschiebung eine steigende Funktion der Temperatur ist, und das andere Element in einem Bereich arbeitet, in dem die Phasenverschiebung eine fallende Funktion der Temperatur ist, wobei die Steuerenergien derart gewählt werden, daß die Phasenverschiebungsgradienten abhängig von der Temperatur sich kompensieren (zweite Lösung, komplementäre Steuerung).

[0016] Die Erfindung wird noch nachstehend mit Bezug auf die schematischen Figuren der Zeichnung erläutert, in der:

[0017] die [Fig. 5](#) eine schematische Darstellung der Phasenverschiebungskurven eines Ferrit-Phasenschieberelementes als Funktion des Steuerstroms für verschiedene Temperaturen ist; unter Berücksichtigung der verwendeten Steuerelektronik sind die Kurven abgestuft im Steuerstrom, entsprechend der erforderlichen Steuerenergie. Nachfolgend wird entweder von der Steuerenergie oder vom entsprechenden Steuerstrom gesprochen.

[0018] die [Fig. 6](#) ein Beispiel eines Phasenschiebers mit Doppelferrittoroiden mit Remanenz-Funktionsweise entsprechend der ersten Lösung der Erfindung ist;

[0019] die [Fig. 7](#) ein Längsschnitt eines Wellenleiters ist, der zwei nicht-reziproke Doppelferrittoroid-Phasenschieberelemente umfaßt, die gemäß der zweiten Lösung der Erfindung geschaltet sind;

[0020] die [Fig. 8](#) eine Schnittansicht einer Vorrichtung analog der aus [Fig. 7](#) ist, jedoch mit einem einzelnen Steuerdraht;

[0021] die [Fig. 9](#) ein Beispiel eines digitalen Vier-Bit-Phasenschiebers mit Remanenz-Funktionsweise ist, der aus mehreren temperaturkompensierten Elementen zusammengesetzt ist (Doppelferrittoroid-Struktur mit rechteckförmigem Leiter);

[0022] die [Fig. 10](#) ein Beispiel eines Versuchsaufbaus eines Vier-Bit-Phasenschiebers ist, der ein aus einem zweiphasigen Element zusammengesetztes Bit und aus Komplementärsteuerungselementen zusammengesetzte Bits umfaßt;

[0023] die [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) die gemessene Differenzphasenverschiebung des ersten und des zweiten Abschnitts des Bits 4 des Phasenschiebers aus [Fig. 10](#) als Funktion der Temperatur darstellen, und

[0024] die [Fig. 13](#) die 16 Schritte der Differenzphasenverschiebungen (vier Bits) als Funktion der Temperatur darstellen.

[0025] In [Fig. 5](#) sind zwei Arbeitspunkte hervorgehoben, für die die Einfügungsphase unabhängig von der Temperatur ist.

[0026] Der erste Punkt (A) wird unter Berücksichtigung eines Versuchsaufbaus eines Doppelferrittoroid-Phasenschieberelementes erhalten, bei dem die Ausbreitungsrichtung die gleiche wie die Richtung des angelegten Anfangssteuerstromes (Reset) ist: Der Doppelferrittoroid wird durch einen Strompuls vorgegebener Dauer und vorgegebenem Wert in Remanenz gesteuert, wodurch der Ferrit initialisiert werden kann und von einem vorgegebenen und bekannten Referenzzustand ausgegangen werden kann. Man bezeichnet diesen Puls als "Rücksetzpuls". Die nach diesem Rücksetzpuls erhaltene Phasenverschiebung ist unabhängig von der vorhergehenden Magnetisierung des Ferriten und dient daher als Bezugspunkt für die Phasenverschiebungskurve als Funktion des Steuerstroms.

[0027] Der zweite Punkt (B) wird unter Berücksichtigung der Kurven erhalten, die die Differenzphasenverschiebung als Funktion des Steuerstroms liefern, parametrisiert als Funktion der Temperatur. In diesem Fall wird der Ferrit immer in Remanenz gesteuert. Man legt an ihn einen doppelten Steuerpuls an, der zusammengesetzt ist aus:

- einem Rücksetzpuls;
- einem Puls mit umgekehrtem Vorzeichen zum Rücksetzpuls, mit vorgegebener Dauer und vorgegebenem Wert, der als "Steuerstrom" bezeichnet wird.

[0028] Die Kurven schneiden sich in zwei Punkten:

Der erste vorgenannte Punkt (A) und der zweite Punkt (B), der "Unempfindlichkeitspunkt" genannt wird, der nicht von den intrinsischen Eigenschaften des Ferriten abhängt.

[0029] In der Praxis legt die Länge des Ferriten den Wert der Phasenverschiebung fest, der am Temperaturunempfindlichkeitspunkt erhalten wird. Man kann daher einen Phasenschieber mit zwei Phasenzuständen realisieren:

- einer Differenzphasenverschiebung vom Wert Null;
- einer festen Differenzphasenverschiebung, deren Wert von der Länge des Ferriten abhängt und daher bedarfsabhängig eingestellt werden kann.

[0030] Indem mehrere zweiphasige Phasenschieber dieses Typs zusammengeschaltet werden, erhält man einen digitalen, temperaturunempfindlichen Phasenschieber. Man erhält somit Phasenverschiebungsgenauigkeiten in der Größenordnung von $\pm 3^\circ$ über 360° und über einen Temperaturbereich von -20°C bis $+80^\circ\text{C}$, während für einen herkömmlichen Phasenschieber ohne Korrektur die Genauigkeit der Phasenverschiebung in der Größenordnung von $\pm 40^\circ\text{C}$ liegt.

[0031] Ein Beispiel eines Versuchsaufbau eines zweiphasigen, temperaturunempfindlichen Elementes gemäß der ersten Lösung der Erfindung ist in [Fig. 6](#) gegeben.

[0032] In dieser Figur ist das von oben gezeigte Element aus zwei Ferrittori (1, 1'), die durch ein Dielektrikum (3) starker Permittivität getrennt sind, in einem rechteckförmigen Wellenleiter (2) zusammengesetzt. Das Bezugszeichen (6) bezeichnet in der Figur den Steuerdraht.

[0033] Die [Fig. 7–Fig. 9](#) beziehen sich auf die zweite Lösung der Erfindung.

[0034] Die [Fig. 7](#) ist eine schematische Ansicht einer Vorrichtung gemäß der zweiten Lösung der Erfindung, mit zwei Doppeltoroid-Phasenschieberelementen (D, D'), die durch ein Dielektrikum (3) getrennt und in Serie in einem Wellenleiter (2) geschaltet sind. Jedes Element umfaßt zwei Ferrittori (1, 1'), die um ein Dielektrikum (3) starker Permittivität angeordnet und durch ein Dielektrikum (3') getrennt ist, das die Anpassung der beiden Elemente sicherstellt. Die Elemente werden von getrennten Steuerschaltungen gesteuert, von denen die Steuerdrähte (6, 6') dargestellt sind.

[0035] In einer vereinfachten Variante ([Fig. 8](#)) hat man zum Preis einer geringen Verschlechterung der Genauigkeit der Phasenverschiebung den Steuerdraht (6) einmal im ersten Element und zweimal im zweiten Element aufgerollt, wodurch somit ein Verhältnis von 2 zwischen den Steuerenergien der beiden Elemente realisiert wird. Man hat somit eine einzelne Steuerung für die beiden Elemente. Dieses Prinzip kann auf beliebige Verhältnisse von ganzzahligen Wicklungszahlen erweitert werden, beispielsweise 3 und 2.

[0036] Die Erfindung ermöglicht die Realisation digitaler, temperaturunempfindlicher Phasenschieber, von denen jedes Bit aus zwei Elementen zusammengesetzt ist, die durch komplementäre Steuerenergien gesteuert werden ([Fig. 9](#)).

[0037] Eine weitere Möglichkeit zum Ausnutzen der Erfindung ist die Realisierung eines temperaturunempfindlichen, analogen Phasenschiebers für einen gewissen Phasenverschiebungsbereich. Tatsächlich stellt man durch genaueres Analysieren der Kurven fest, daß für den Abschnitt der Kurve entsprechend der Steuerenergien kleiner als diejenigen am Temperaturunempfindlichkeitspunkt, daß ein bestimmter Phasenverschiebungsbereich existiert, bei dem der Phasenverschiebungsgradient als Funktion der Temperatur in etwa konstant ist. Man kann daher einen aus zwei Elementen zusammengesetzten Phasenschieber realisieren, von denen der eine eine feste (oder variable) Steuerenergie hat, größer als diejenige am Temperaturunempfindlichkeitspunkt, und der andere eine über einen bestimmten Bereich variable und kleinere als die am Temperaturunempfindlichkeitspunkt vorliegende Steuerenergie hat, wobei diese beiden Energien praktisch komplementär über einen bestimmten Phasenverschiebungsbereich sind, was von der Geometrie und der Natur des Ferritmaterials abhängt. Man erhält somit ein temperaturunempfindliches, analoges Phasenschieberelement über einen gewissen Temperaturbereich, im Gegensatz zu einem digitalen Phasenschieber, der zweiphasig (zwei Zustände) arbeitet. Man kann daher mehrere dieser analogen Phasenschieberelemente zusammenschalten, um einen temperaturunempfindlichen, analogen Phasenschieber zu realisieren, der über einen vergrößerten Phasenverschiebungsbereich arbeitet. Man kann auch ein oder mehrere dieser analogen Phasenschieberelemente mit temperaturunempfindlichen, zweiphasigen Elementen zusammenschalten, um die Auflösung der gesamten Phasenverschiebung zu erhöhen (geringstmögliche Variation der Phasenverschiebung).

[0038] Diese Ferrit-Phasenschiebervorrichtung, die in Remanenz gesteuert wird, besitzt eine weitere Eigenschaft: Die Stabilität der Einfügungsphase als Funktion der Temperatur. All die vorgenannten Entdeckungen erstrecken sich auf die Differenzphasenverschiebung als Funktion der Temperatur. Diese Stabilität der Einfügungsphase kann man für einen vorgegebenen Arbeitspunkt beobachten, bei dem die Einfügungsverluste minimal sind. Komplementäre Messungen haben gezeigt, daß die Einfügungsphase äußerst wenig mit der Temperatur variiert, was ein wichtiges Element für die großen Gruppenantennen ist, bei denen ein Temperaturgradient zwischen den Phasenschiebern vorliegen kann, was eine unpassende Fehlausrichtung durch Variation der Phase hervorruft. Um diese Stabilität der Einfügungsphase hervorzuheben, muß der Arbeitspunkt, der durch minimale Einfügungsverluste bestimmt ist, für eine Richtung des Steuerstroms und eine vorgegebene Ausbreitungsrichtung ermittelt werden.

BEISPIEL

[0039] Es ist ein temperaturunempfindlicher 4-Bit-Phasenschieber realisiert worden. In diesem Beispiel wird ein Bit der Phasenverschiebung entweder ausgehend von einem zweiphasigen Element, das seinerseits temperaturunempfindlich ist, oder ausgehend von zwei Elementen mit komplementärer Steuerung realisiert. Die beiden Techniken sind zum Realisieren dieses Versuchsaufbaus eines temperaturunempfindlichen Phasenschiebers angewandt worden.

[0040] Der 4-Bit-Versuchsaufbau ist mit 7 Phasenverschiebungsabschnitten durchgeführt worden. Die drei Bits starker Gewichtung sind jeweils durch zwei Elemente mit komplementärer Steuerung gebildet worden und das Bit schwacher Gewichtung ($22^\circ 5'$) ist durch ein zweiphasiges Element gebildet worden. Dies kann eine ausreichende Genauigkeit ($\pm 1^\circ$) sicherstellen und hat den Vorteil, daß es nur einen einzelnen Abschnitt aufweist. Die verschiedenen Abschnitte sind durch dielektrische Elemente mit geringen Verlusten (Magnesiumtitanat mit einer Permittivität **13**) getrennt. Sie werden derart bemessen, daß die Impedanzstetigkeit in der Struktur des vollständigen Phasenschiebers sichergestellt wird. Sie sind auch geeignet, die Durchführung der Steuerleitungen zu erleichtern. Die schematische Ansicht des realisierten Versuchsaufbaus ist in [Fig. 10](#) dargestellt.

[0041] Mehrere experimentelle Versuchsaufbauten sind realisiert worden und um 20 GHz herum untersucht worden. Im Prinzip wird ein Bit durch zwei Abschnitte identischer Länge realisiert. Jedoch kann aufgrund von Dispersionen im Versuchsaufbau einer der beiden Abschnitte eine geringere Wirksamkeit haben. Aus diesem Grund hat man einen der beiden Abschnitte überdimensioniert, um den etwaigen Wirksamkeitsverlust der Phasenverschiebung aufgrund der Dispersion des Versuchsaufbaus im Labor zu kompensieren.

[0042] Dies ist der Grund, warum der 4-Bit-Versuchsaufbau ([Fig. 10](#)), der im Labor realisiert worden ist, die folgenden Abschnitte umfaßt:

- Bit 1 ($22^\circ 5'$), zweiphasiges Element mit einem Abschnitt der Länge 1,4 mm. Dieses Element ist entsprechend dem Prinzip aus [Fig. 5](#) durch Einstellen der Länge erhalten worden. Man erhält daher eine Zweiphasen mit $22,5^\circ \pm 0,5^\circ$.
- Bit 2 (45°) mit zwei Abschnitten der Länge: L1 = 2 mm und L2 = 1,5 mm
- Bit 3 (90°) mit zwei Abschnitten der Länge: L1 = 4,2 mm und L2 = 3 mm
- Bit 4 (180°) mit zwei Abschnitten der Länge: L1 = 7,4 mm und L2 = 6 mm.

[0043] Der Phasenschieber arbeitet in Remanenz ("Latching Mode"), und der Querschnitt ist entsprechend den klassischen Dimensionierungsregeln dimensioniert.

[0044] Die Steuerenergie wird durch einen programmierbaren Strompuls geliefert. Die Steuerung im Remanenzmodus verwendet Stromfolgen mit entgegengesetztem Vorzeichen: (RESET/SET – Initialisierung/Phasenverschiebung).

[0045] Für eine Richtung des Steuerstroms in den Ferritkern hängt die erzeugte Phasenverschiebung von der Ausbreitungsrichtung im Phasenschieber ab (Phasenvoreilung und Phasenverzögerung). Auch wenn die Phasenverschiebungskurven als Funktion des Steuerstroms die gleiche Gestalt (auf das Vorzeichen genau) für die beiden Ausbreitungsrichtungen haben, läßt man den Phasenschieber geeigneterweise derart arbeiten, daß die Ausbreitungsrichtung die gleiche wie die Stromrichtung des Steuerstroms ist. Für den RESET-Modus stellen diese Funktionsbedingungen eine gute Stabilität der Referenzeinfügungsphase abhängig von der Temperatur sicher.

[0046] Die erste Arbeitsphase besteht darin, für jeden der sieben Abschnitte die Phasenverschiebungskurven als Funktion des Steuerstroms für die verschiedenen Temperaturen zu zeichnen. Die 4 temperaturunempfindlichen Basisbits können unter Berücksichtigung der folgenden Kombinationen erhalten werden:

- Bit 1 ($22,5^\circ$), zweiphasiges Element, ausgehend vom siebten Abschnitt (1,4 mm) mit einem Steuerstrom von 0,85 A
- Bit 2 (45°), ausgehend von 2 Abschnitten: 5 (2 mm) mit 1,3 A und 6 (1,5 mm) mit 0,53 A
- Bit 3 (90°), ausgehend von 2 Abschnitten: 3 (4,2 mm) mit 0,67 A und 4 (3 mm) mit 1,08 A
- Bit 4 (180°), ausgehend von 2 Abschnitten: 1 (7,4 mm) mit 0,88 A und 2 (6 mm) mit 1,8 A.

[0047] Die [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) zeigen die gemessenen Differenzphasenverschiebungen der Abschnitte 1 und 2 des Bits 4 als Funktion der Temperatur.

[0048] Die 15 Werte der Differenzphasenverschiebungen (ungleich 0) erhält man durch Addieren der verschiedenen Bits. Der maximale Abstand jedes der 15 Phasenverschiebungswerte im Temperaturbereich von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ ist in der folgenden Tabelle angegeben:

Phasenverschiebungszustände	0°	$22^{\circ}5$	45°	$67^{\circ}5$	90°	$112^{\circ}5$	135°	$157^{\circ}5$
Maximale Abstände	0°	$2^{\circ}6$	$1^{\circ}1$	$3^{\circ}6$	$1^{\circ}5$	4°	$2^{\circ}1$	$4^{\circ}5$

Phasenverschiebungszustände	180°	$202^{\circ}5$	225°	$247^{\circ}5$	270°	$292^{\circ}5$	315°	$337^{\circ}5$
Maximale Abstände	$2^{\circ}7$	$1^{\circ}2$	$2^{\circ}1$	3°	$1^{\circ}8$	$2^{\circ}3$	$1^{\circ}1$	$2^{\circ}5$

[0049] Um zu demonstrieren, daß diese Ergebnisse typische Werte sind, sind die gleichen Messungen auf einem anderen experimentellen Versuchsaufbau des digitalen 4-Bit-Phasenschiebers durchgeführt worden. Die festgestellten maximalen Abstände sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Phasenverschiebungszustände	0	$22^{\circ}5$	45°	$67^{\circ}5$	90°	$112^{\circ}5$	135°	$157^{\circ}5$
Maximale Abstände von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$	0	$1^{\circ}9$	$1^{\circ}6$	$3^{\circ}6$	2°	1°	$3^{\circ}4$	$3^{\circ}5$
Maximale Abstände von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$	0	$2^{\circ}6$	$1^{\circ}6$	$3^{\circ}6$	$3^{\circ}5$	$3^{\circ}4$	$4^{\circ}9$	2°

Phasenverschiebungszustände	180°	$202^{\circ}5$	225°	$247^{\circ}5$	270°	$292^{\circ}5$	315°	$337^{\circ}5$
Maximale Abstände von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$	2	$2^{\circ}2$	$3^{\circ}1$	$2^{\circ}8$	4°	$4^{\circ}2$	$5^{\circ}4$	$5^{\circ}2$
Maximale Abstände von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$	$3^{\circ}6$	$3^{\circ}5$	$3^{\circ}1$	$4^{\circ}5$	4°	$5^{\circ}5$	$5^{\circ}4$	$6^{\circ}9$

[0050] Man kann feststellen, daß der maximale Spitze-zu-Spitze-Abstand kleiner als 6° ist. Die Genauigkeit jeder der 15 Phasenverschiebungswerte (ungleich Null) ist besser als $\pm 3^{\circ}$ für den Temperaturbereich von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$. Auf gleiche Weise erhält man praktisch die gleiche Genauigkeit für den erweiterten Bereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$.

[0051] Zudem kann festgestellt werden, daß die Einfügungsphase in der Größenordnung von $\pm 3^{\circ}$ im Temperaturbereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ variiert. Diese Ergebnisse sind in den vorstehenden Tabellen und in [Fig. 13](#) für einen Bereich von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ angegeben.

Analoge Funktionsweise:

[0052] Ausgehend von Eichkurven der Phasenverschiebungen als Funktion des Steuerstroms und der Temperatur stellt man fest, daß die Temperaturkompensation in einem bestimmten Funktionsbereich stattfinden kann. Daher kann das Bit 180° von 150° bis 202° arbeiten, unter der Bedingung, daß die Wertepaare des Steuerstromes getauscht werden. Dasselbe gilt für die Bits 90° und 45°.

[0053] Für den realisierten Versuchsaufbau können die 3 Bits jeweils in einem nicht-vernachlässigbaren Phasenverschiebungsbereich arbeiten:

- Das Bit 180° von 165° bis 202°
- Das Bit 90° von 90° bis 107°
- Das Bit 45° von 45° bis 55°
- Das Bit 22°5 (zweiphasig).

[0054] Die diversen Kombination dieser Basiselemente ermöglichen den Erhalt stetiger Steuerungsbereiche der Phasenverschiebung durch Variation der Wertepaare des Steuerstroms, nach Art eines analogen Phasenschiebers.

[0055] Die in diesem Versuchsaufbau typischerweise erhaltene Genauigkeit ist besser als $\pm 3^\circ$ im Temperaturbereich von -20°C bis $+60^\circ\text{C}$.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Höchstfrequenz-Ferritoroid-Phasenschieberelementes mit einer Steuerenergie, bei dem der Wert der Steuerenergie bestimmt wird, bei dem die Phasenverschiebung in etwa temperaturunempfindlich ist, und entweder das Element mit diesem Wert gesteuert wird oder dieses in Serie mit einem anderen identischen (oder im wesentlichen identischen) Phasenschieberelement geschaltet wird und die beiden Elemente mit Steuerenergien gesteuert werden, deren Werte jeweils kleiner und größer als der genannte Wert sind, so daß die Phasenverschiebungsgradienten der beiden Elemente als Funktion der Temperatur sich kompensieren.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Element mit einer Steuerenergie gesteuert wird, die so ausgewählt ist, daß die resultierende Phasenverschiebung in etwa unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem wenigstens zwei identische oder im wesentlichen identische Elemente in Serie geschaltet werden und diese Elemente mit Steuerenergien gesteuert werden, derart, daß die Phasenverschiebungsgradienten der beiden Elemente als Funktion der Temperatur sich kompensieren.

4. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem die beiden Elemente über verschiedene Steuerleitungen gesteuert werden, die von Strömen unterschiedlicher Intensität durchlaufen werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem die beiden Elemente über eine gemeinsame Steuerleitung gesteuert werden, die um die Ferriten herum unterschiedliche ganzzahlige Wicklungszahlen haben.

6. Elektrisch gesteuerte Ferrit-Phasenschiebervorrichtung (**1**, **1'**), dadurch gekennzeichnet, daß sie wenigstens zwei identische oder im wesentlichen identische Ferrit-Phasenschieberelemente (**D**, **D'**) umfaßt, die in Serie geschaltet sind und mit unterschiedlichen Steuerenergien gesteuert werden, derart, daß von den Elementen jeweils das eine in einem Bereich funktioniert, in dem die Phasenverschiebung eine steigende Funktion der Temperatur ist, und das andere in einem Bereich funktioniert, in dem die Phasenverschiebung eine fallende Funktion der Temperatur ist, wobei die Steuerenergien derart ausgewählt werden, daß die Phasenverschiebungsgradienten der beiden Elemente als Funktion der Temperatur sich kompensieren.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, bei der die beiden Phasenschieberelemente (**D**, **D'**) über verschiedene Steuerleitungen (**6**, **6'**) gesteuert werden, in denen unterschiedliche Steuerströme umlaufen.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6, bei der die beiden Phasenschieberelemente über eine gemeinsame Steuerleitung (**6**) gesteuert werden, in der der gleiche Steuerstrom umläuft, die jedoch unterschiedliche ganzzahlige Wicklungszahlen um die Ferriten herum hat.

9. Vorrichtung nach Anspruch 6, bei der die Phasenschieberelemente analog funktionieren.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, bei der jedes Phasenschieberelement ein nichtreziproker Phasenschieber ist, der einen Einzelferrittorus (**1**, **1'**) umfaßt.
11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, bei der jedes Phasenschieberelement ein nichtreziproker Phasenschieber mit Doppelferrittorus (**1**, **1'**) ist.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, die mehrere Paare von Phasenschieberelementen (D1, D'1, D2, D'2, D3, D'3, D4, D'4) umfaßt, die zum Bilden eines digitalen Phasenschiebers paarweise geschaltet sind.
13. Elektrisch gesteuerte Ferrit-Phasenschiebervorrichtung, dadurch gekennzeichnet, daß sie mit einer Steuerenergie gesteuert wird, die derart ausgewählt ist, daß die Phasenverschiebung in etwa temperaturunabhängig ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, bei der die Phasenschieberelemente zweiphasig arbeiten.
15. Verwendung einer Phasenschiebervorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 14 bei einem Radar, einer Richtfunkverbindung, einer Antenne oder einem Schalter.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

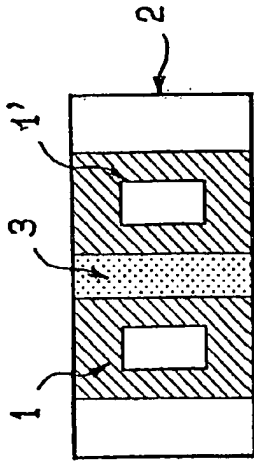


FIG. 2

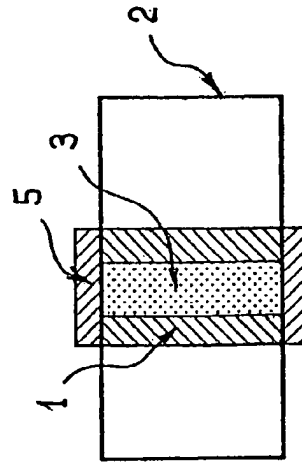


FIG. 4

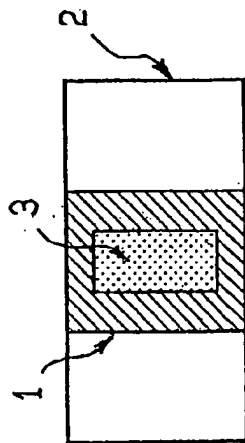


FIG. 1

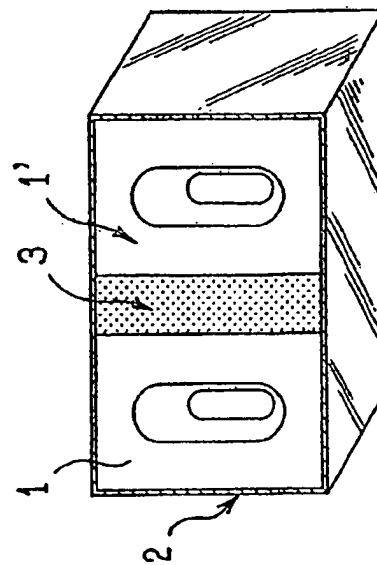
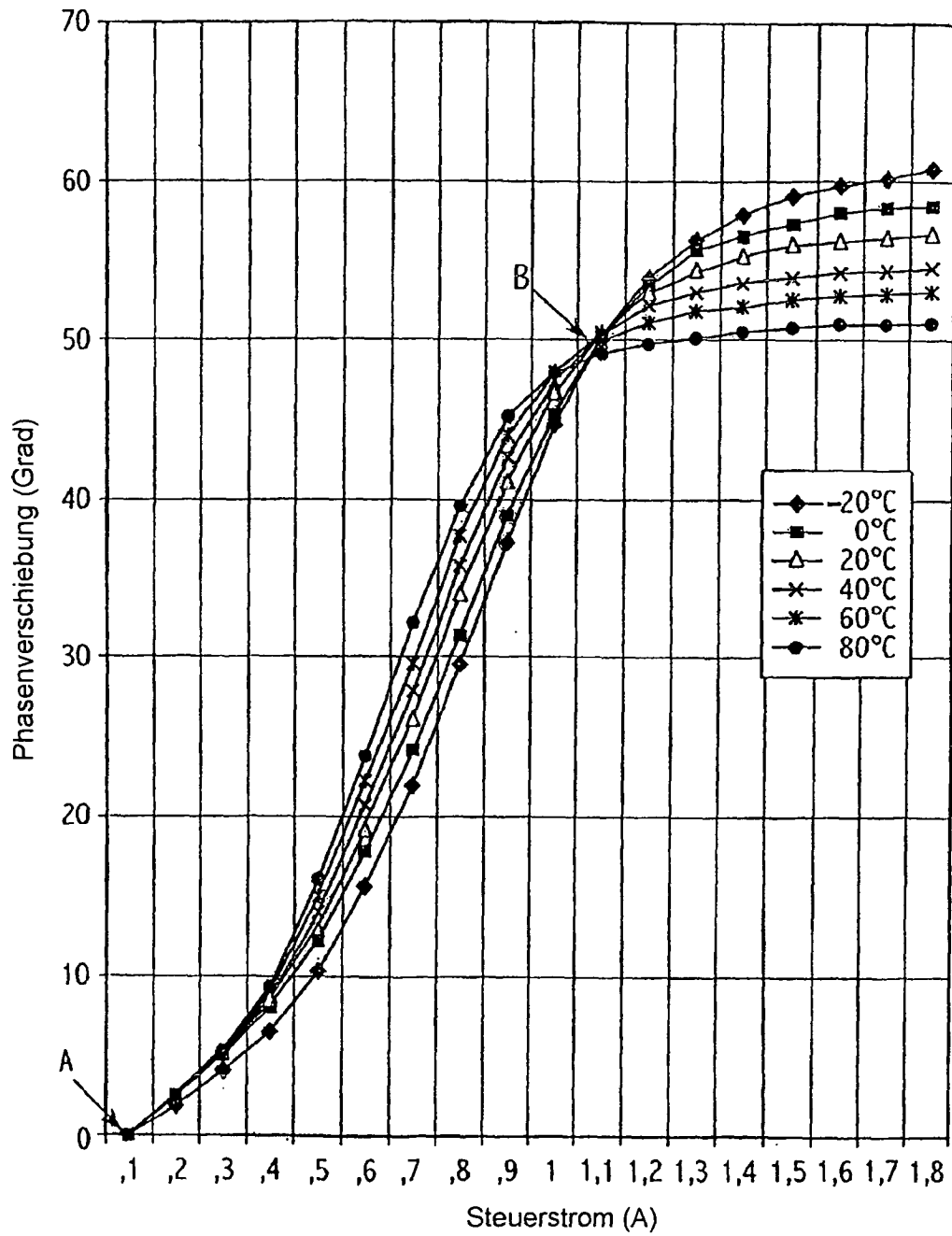
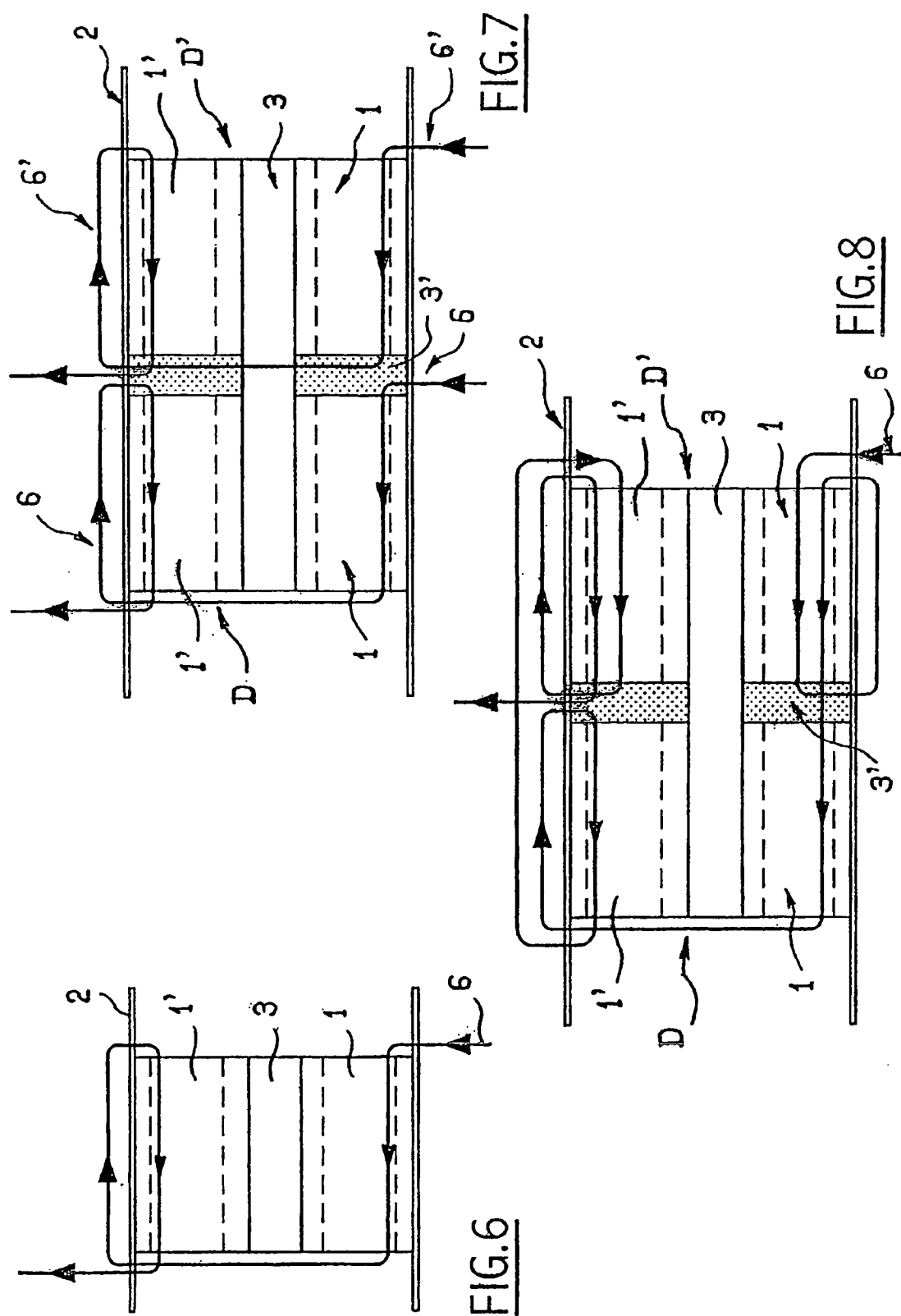


FIG. 3

FIG.5



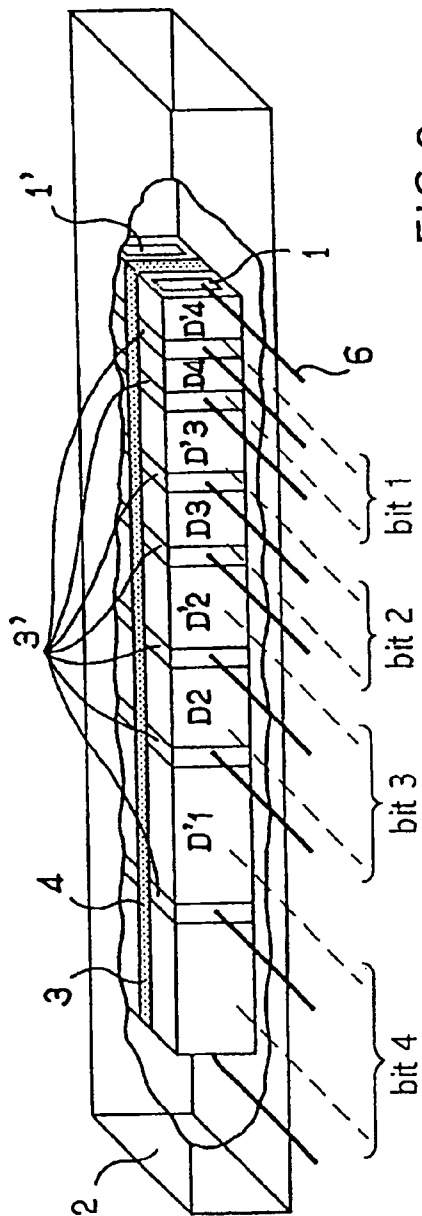


FIG. 9

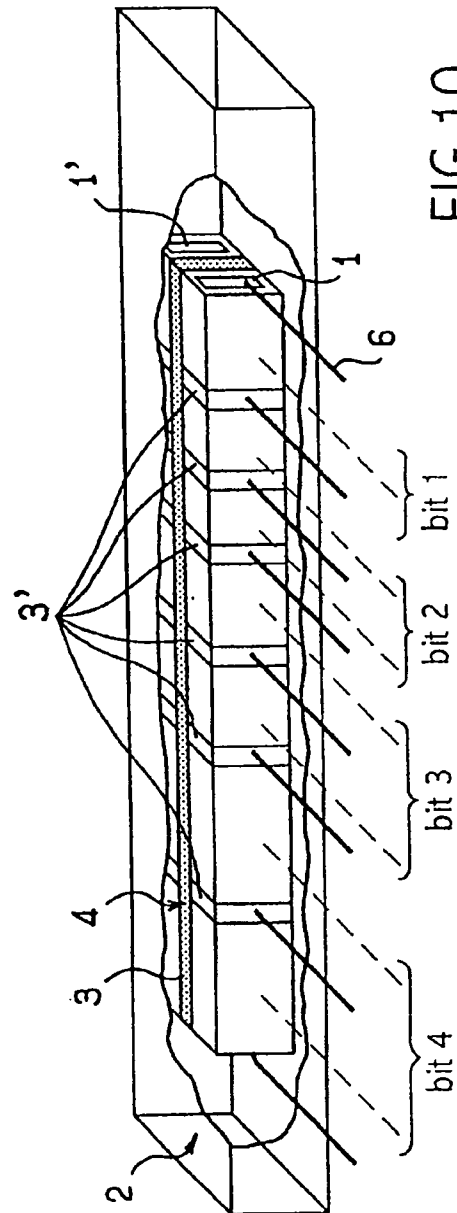


FIG. 10

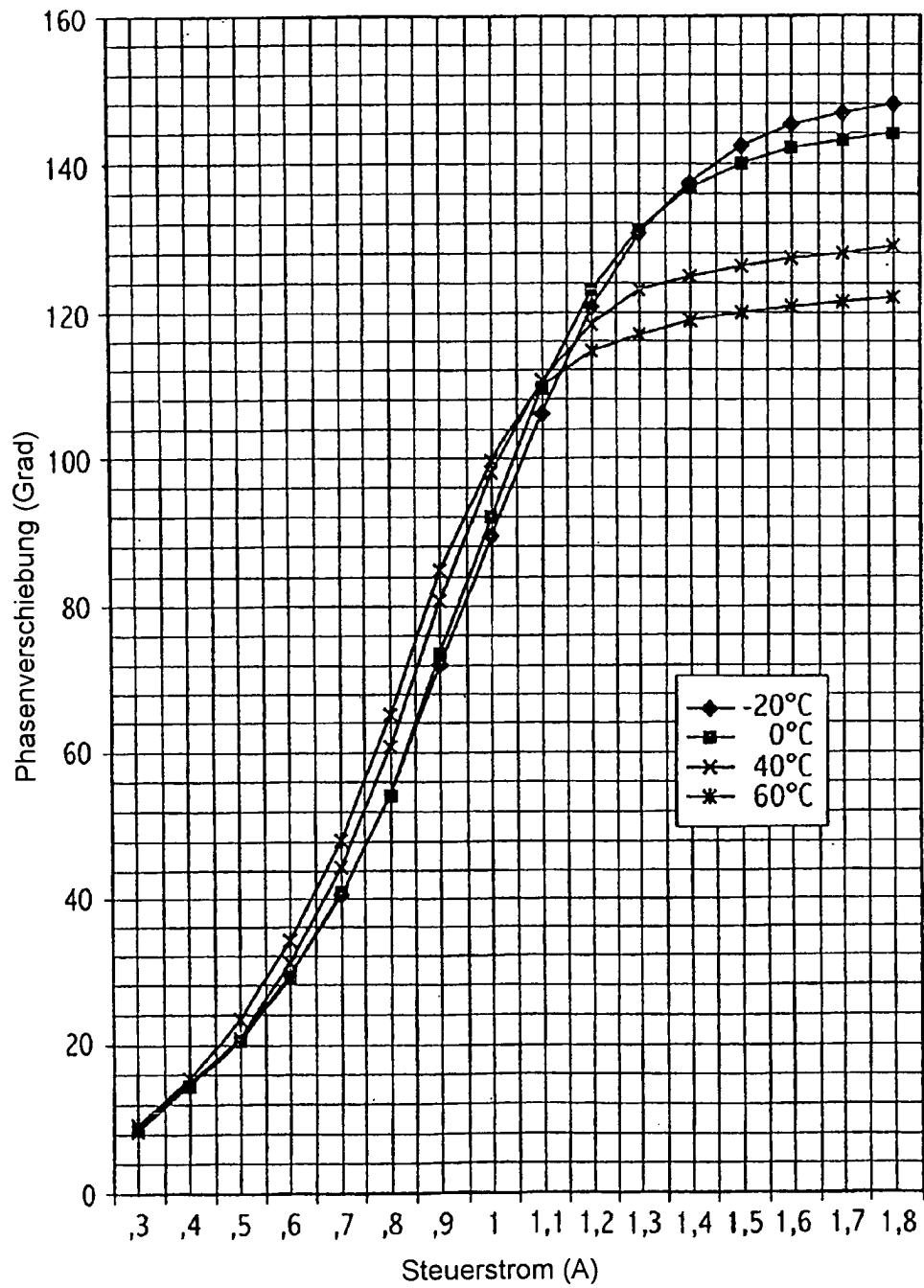
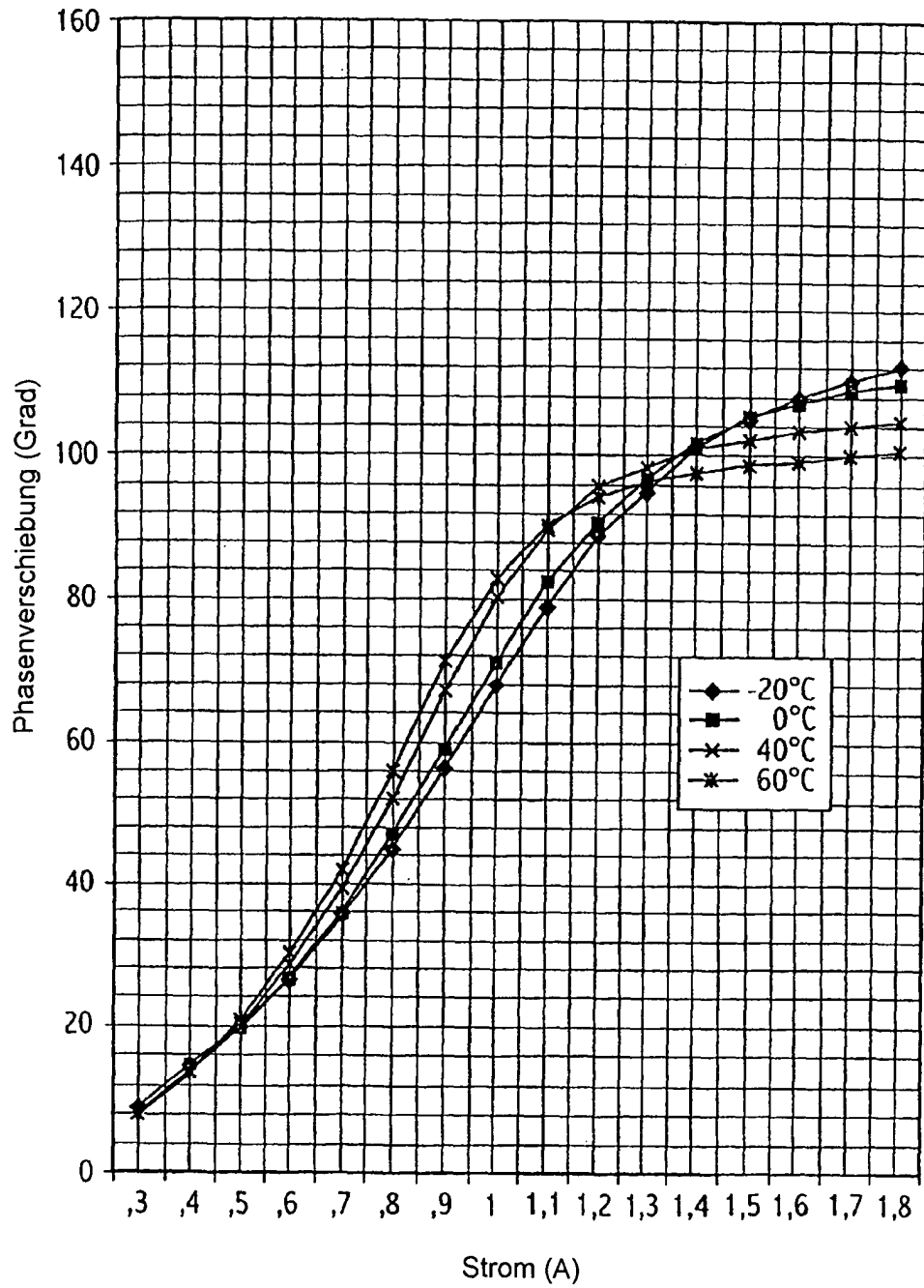


FIG.11

FIG.12

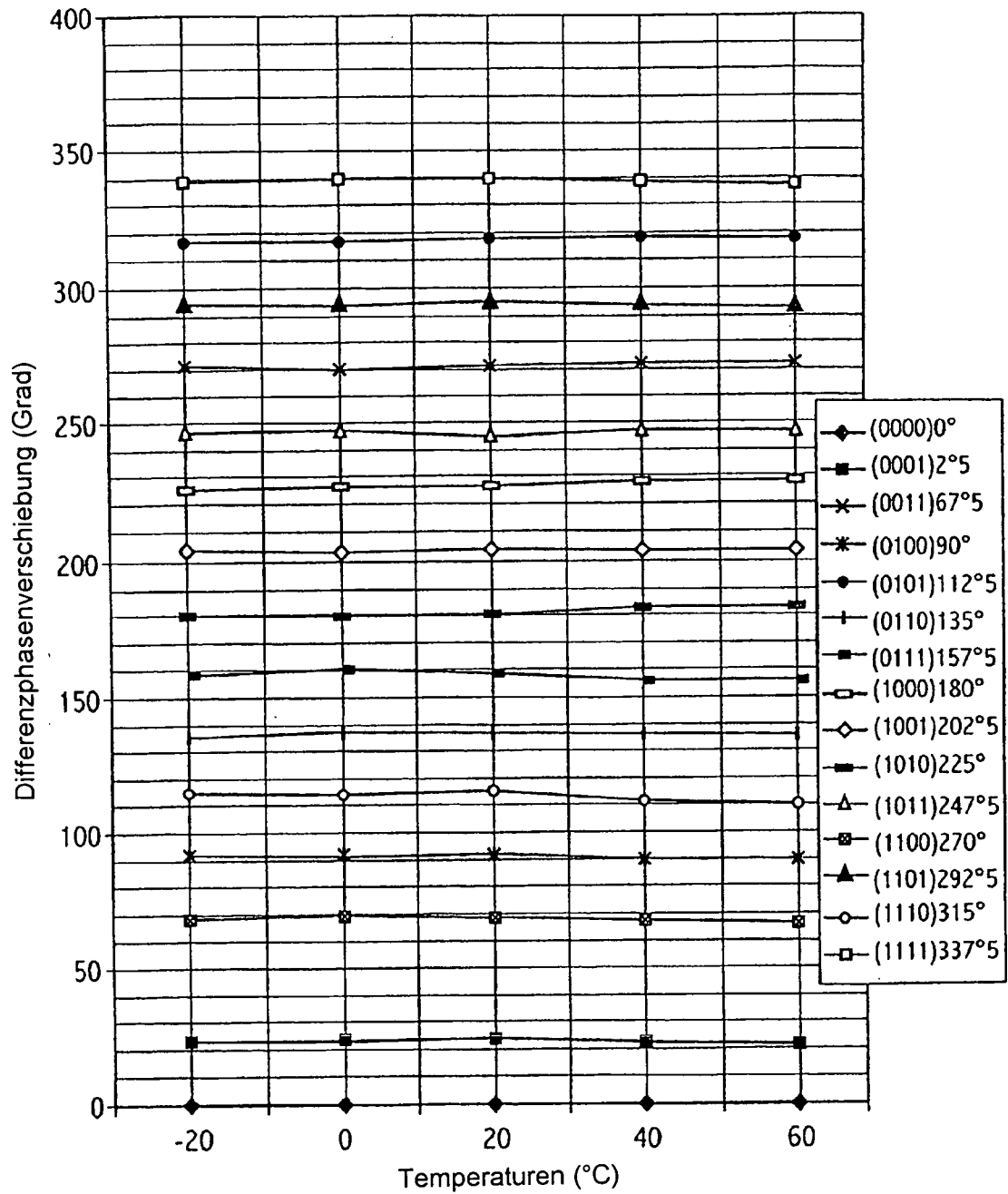


FIG. 13