(19) österreichisches patentamt

(10) **AT 510 948 A2 2012-07-15**

(12) # Österreichische Patentanmeldung

(21) Anmeldenummer: A 2128/2010
(22) Anmeldetag: 23.12.2010
(43) Veröffentlicht am: 15.07.2012

(51) Int. Cl. : ***H01F 1/00*** (2006.01)
G11B 5/62 (2006.01)

(73) Patentanmelder:
SCHREFL THOMAS DR.
A-3130 HERZOGENBURG (AT)

(54) **METHODE ZUR OPTIMIERUNG DER THERMISCHEN STABILITÄT VON MAGNETISCHEN STRUKTUREN DURCH DIE BERECHNUNG DER ZEITABHÄNGIGKEIT DER MAGNETISIERUNG**

(57) Die Erfindung kann die optimale Schichtdicke magnetischer Speichermedien bestimmen. Die Erfindung hebt die Einschränkung gängiger Methoden auf, indem magnetische Körner zufällig ausgewählt werden und dann durch die Berechnung der Umklappwahrscheinlichkeit

$$P_s = 1 - e^{-t_m/\tau},$$

entschieden wird, ob das Korn umklappt oder nicht, wobei τ die Relaxationszeit nach

$$\tau = \tau_0 e^{\Delta E / k_B T}$$

ist. Der Zeitschritt t_m wird so berechnet, dass die Umklappwahrscheinlichkeit gleich einem konstanten P_S ist. Folglich wird t_m bestimmt durch

$$t_m = -\log(1 - P_s) / (1/\tau),$$

wobei P_S (Umklappwahrscheinlichkeit) ein Input-Parameter ist, welcher die Umklappwahrscheinlichkeit des ausgewählten Korns definiert. Ein empfohlener Bereich für diesen Parameter sind Werte zwischen 0,001 und 0,5.

Mit einer kleineren Zahl P_S werden die Ergebnisse genauer. Jedoch wird auch mehr Rechenzeit benötigt. Dieser Zeitschritt t_m wird für jedes magnetische Korn berechnet und in einer Liste abgespeichert. Der Minimalwert dieser Liste wird zur Bestimmung von t_m verwendet. Während der Simulation können externe Felder an das magnetische System angelegt werden, was nach einigen Iterationen die Neuberechnung des Zeitschritts t_m erfordern kann. Das Ergebnis für die thermische Entmagnetisierung der magnetischen Struktur wird für die Bestimmung der minimalen Schichtdicke verwendet, die notwendig ist, um die geforderte thermische Stabilität zu erhalten. Diese Information wird in der Sputter-Anlage verwendet, um die Schicht herzustellen.

AT 510 948 A2 2012-07-15

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung kann die optimale Schichtdicke magnetischer Speichermedien bestimmen. Die Erfindung hebt die Einschränkung gängiger Methoden auf, indem magnetische Körner zufällig ausgewählt werden und dann durch die Berechnung der Umklappwahrscheinlichkeit

$$P_s = 1 - e^{-t_m/\tau},$$

entschieden wird, ob das Korn umklappt oder nicht, wobei τ die Relaxationszeit nach

$$\tau = \tau_0 e^{\Delta E / k_B T}$$

ist. Der Zeitschritt t_m wird so berechnet, dass die Umklappwahrscheinlichkeit gleich einem konstanten P_s ist. Folglich wird t_m bestimmt durch

$$t_m = -\log(1 - P_s) / (1/\tau),$$

wobei P_s (Umklappwahrscheinlichkeit) ein Input-Parameter ist, welcher die Umklappwahrscheinlichkeit des ausgewählten Korns definiert. Ein empfohlener Bereich für diesen Parameter sind Werte zwischen 0,001 und 0,5. Mit einer kleineren Zahl P_s werden die Ergebnisse genauer. Jedoch wird auch mehr Rechenzeit benötigt. Dieser Zeitschritt t_m wird für jedes magnetische Korn berechnet und in einer Liste abgespeichert. Der Minimalwert dieser Liste wird zur Bestimmung von t_m verwendet. Während der Simulation können externe Felder an das magnetische System angelegt werden, was nach einigen Iterationen die Neuberechnung des Zeitschritts t_m erfordern kann. Das Ergebnis für die thermische Entmagnetisierung der magnetischen Struktur wird für die Bestimmung der minimalen Schichtdicke verwendet, die notwendig ist, um die geforderte thermische Stabilität zu

NACHGEREICHT

erhalten. Diese Information wird in der Sputter-Anlage verwendet, um die Schicht herzustellen.

NACHGEREICHT

Methode zur Optimierung der thermischen Stabilität von magnetischen Strukturen durch die Berechnung der Zeitabhängigkeit der Magnetisierung

GEBIET DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Methode zur Optimierung der thermischen Stabilität von magnetischen Strukturen durch die Berechnung der Zeitabhängigkeit der Magnetisierung einer magnetischen Struktur, insbesondere der thermischen Abnahme der Magnetisierung.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Um magnetische Speichermedien zu produzieren ist ein detailliertes Kenntnis der zugrundeliegenden magnetischen Umorientierungsprozesse wichtig. Die vorliegende Erfindung kann zur Regelung der hergestellten Schichtdicken durch die Berechnung und Einspeisung der erforderlichen magnetischen Daten in eine Sputter-Anlage verwendet werden. Dies erfordert die Berechnung der Abnahme der Magnetisierung als Funktion von Zeit und Temperatur. Ein etabliertes Werkzeug für die Vorhersage der Magnetisierungsdynamik in einer Vielzahl von Anwendungen, welche von Festplattenspeichern über magnetischen Sensoren bis hin zu Permanentmagneten reichen, ist die Theorie des Mikromagnetismus, bei der die Magnetisierung $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r})$ als kontinuierliche Funktion des Orts angenommen wird (Brown1968). Die zeitliche Entwicklung der Magnetisierung am absoluten Nullpunkt der Temperatur kann durch die Lösung der Landau-Lifshitz-Gleichung (Landau1935) berechnet werden. Einer der wesentlichen Nachteile der Landau-Lifshitz-Gleichung ist, dass es nicht möglich ist die thermische Stabilität von

NACHGEREICHT

magnetischen Strukturen vorherzusagen, welche für einige Anwendungen von größter Wichtigkeit ist. So hängt zum Beispiel die Lebensdauer von gespeicherten Informationen (thermische Stabilität) in kommerziellen Festplatten mit der Stabilität des Magnetisierungszustands in jedem der Körner, aus welchen das Speichermedium besteht, zusammen. Die durchschnittliche Lebensdauer kann durch das Arrhenius-Néel-Gesetz

$$\tau = \tau_0 e^{\Delta E / k_B T} \qquad (1)$$

bestimmt werden. Dabei ist ΔE die Energiebarriere, welche die zwei magnetischen Zustände mit den niedrigsten Energien in einem Korn eines Speichermediums trennt. τ_0 ist der Kehrwert der *attempt frequency*. Eine gebräuchliche Methode zur experimentellen Bestimmung dieser Energiebarriere wurde von Sharrock (Sharrock1994) vorgeschlagen. Zur Vorhersage und Entwicklung neuer funktioneller Strukturen ist es allerdings wichtig, eine Möglichkeit zu haben, die Energiebarriere zu berechnen. Die *nudged elastic band* Methode ist ein mächtiges Werkzeug zur Berechnung der Energiebarriere eines einzelnen Korns (Henkelmann2000, Dittrich2002). Für die Berechnung der Abnahme der Magnetisierung, z.B. eines granularen Speichermediums, liefert allerdings die alleinige Anwendung der *nudged elastic band*-Methode die Magnetisierung nicht als Funktion von Zeit oder Feld, da sie nur die Wahrscheinlichkeit liefert, mit der ein einzelnes Korn umklappt. Der Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den Körnern kann daher nicht berücksichtigt werden, welche aber für die Vorhersage des Signal-Rausch-Verhältnises und der daraus resultierenden Fehlerrate als Funktion von Zeit und Temperatur wichtig sind. Für diese wechselwirkenden Systeme können Monte-Carlo-Methoden verwendet werden. Charap et al. verwendeten Monte-Carlo-Methoden um das Limit der Speicherdichte für longitudinales Recording zu bestimmen (Charap1997). Bei dieser Methode die Wahrscheinlichkeit

NACHGEREICHT

$$p = r_i / R \qquad (2)$$

bestimmt, mit der die Magnetisierungen des Kornes i, ummagnetisiert, wobei die Umklapp-Rate für das i-te Korn $r_i = 1/\tau$ ist und $R = \sum_{i=1}^{N} r_i$.

Ein großer Nachteil von Charaps Methode ist, dass die Umklappwahrscheinlichkeit eines einzelnen Korns mit R abnimmt. Auf der anderen Seite steigt R linear mit der Anzahl der Körner. Daher wird die Methode bei steigender Systemgröße unanwendbar, da die Umklappwahrscheinlichkeit für große N gegen null geht. In der Folge müssen mehr und mehr Monte-Carlo-Iterationen durchgeführt werden, um ein Umklappereignis beobachten zu können.

Die Erfindung räumt diesen Nachteil aus, indem sie eine Methode einführt, bei der die Umklappwahrscheinlichkeit nicht von der Größe des Systems abhängt. Daher ist mit diese Methode eine Berechnung der Abnahme der Magnetisierung auf Zeitskalen von Jahren möglich. Für ein gegebenes magnetisches Material kann die obige Methode die Schichtdicke eines magnetischen Mediums berechnen, die notwendig ist, um die Abnahme der Magnetisierung unter dem geforderten Limit zu halten. Folglich ist die Erfindung zur Simulation großer magnetischer Systeme geeignet und kann dazu verwendet werden, die erforderlichen Parameter einer Sputter-Anlage zu regeln.

BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Kurzbeschreibung der Erfindung

NACHGEREICHT

Die Erfindung kann die optimale Schichtdicke in magnetischen Speichermedien bestimmen. Sie hebt die zuvor beschriebenen Einschränkungen auf, indem magnetische Körner zufällig ausgewählt werden und durch die Berechnung der Umklappwahrscheinlichkeit eines Korns

$$P_s = 1 - e^{-t_m/\tau}, \tag{3}$$

entschieden wird, ob dieses Korn umklappt oder nicht, wobei τ die durch Gl. (1) gegebene Relaxationszeit ist. Der Zeitschritt t_m wird dadurch berechnet, dass die Umklappwahrscheinlichkeit gleich einem konstanten Wert P_s ist. Folglich wird t_m durch

$$t_m = -\log(1 - P_s) / (1/\tau), \tag{4}$$

berechnet, wobei P_s (Umklappwahrscheinlichkeit) ein Eingabeparamter ist, welcher die Umklappwahrscheinlichkeit des ausgewählten Korns definiert. Ein empfohlener Bereich für diesen Parameter liegt zwischen 0,001 und 0,5. Mit kleineren Werten P_s sind die Ergebnisse genauer. Allerdings ist dann auch mehr Rechenzeit erforderlich. Dieser Zeitschritt t_m wird für jedes magnetische Korn berechnet und in einer Liste abgespeichert. Der Minimalwert in dieser Liste wird für die Bestimmung von t_m verwendet. Während der Simulation können auch externe Felder an das magnetische System angelegt werden, was nach einigen Iterationen eventuell die Neuberechnung des Zeitschritts t_m erfordert. Die Ergebnisse für die thermische Entmagnetisierung der magnetischen Struktur dienen zur Bestimmung der minimalen Schichtdicke, welche für das Erreichen der geforderten thermischen Stabilität nötig ist. Diese Information wird für die Sputter-Anlagen verwendet, um die Schicht herzustellen.

KURZBESCHREIBUNG DER ABBILDUNGEN

Abb. 1 ist ein Flussdiagramm der Berechnung der magnetischen Zustände gemäß der vorliegenden Erfindung

NACHGEREICHT

Abb. 2 zeigt den magnetischen Anfangszustand

Abb. 3 zeigt den magnetischen Zustand nach 80 Sekunden.

Abb. 4 vergleicht die Abnahme der Magnetisierung eines Speichermediums nach Methode 1 bzw. nach Methode 2.

Abb. 5 zeigt die Integration der Berechnung der thermischen Stabilität in ein Sputter-System.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

Die obige Diskussion wird durch folgende detaillierte Beschreibung der Erfindung in Kombination mit den zugehörigen Abbildungen (Abb. 1 – Abb. 4) besser verständlich. Ein magnetisches System kann, wie in Abb. 2 dargestellt, aus einem Ensemble magnetischer Körner (11) mit einem Durchmesser von 7 nm bestehen. Die magnetischen Körner werden durch die Verwendung einer Voronoi-Zerlegung (Watson 1981) erstellt. Die Magnetisierungen all dieser Körner können zu Beginn in die gleiche Richtung zeigen und repräsentieren zum Beispiel ein Bit eines magnetischen Speichermediums. Die leichte Richtung dieser Körner ist uniaxial und normal zu der Schichtebene. Aufgrund von thermischen Fluktuationen der Magnetisierung können manche dieser Körner, welche in Abb. 3 als schwarze Körner (14) dargestellt sind, umklappen. Um diese Umklappereignisse als Funktion der Zeit berechnen zu können, schlägt die Erfindung eine Methode vor, deren grundsätzliche Funktionsweise in Abb. 1 dargestellt ist. Für jeden magnetischen Zustand muss das effektive Feld auf jedes Korn berechnet werden. Dies kann zum Beispiel durch die Verwendung der Finite Elemente Methode (Schrefl1999) durchgeführt werden. Das effektive Feld beinhaltet die Streufeld-Wechselwirkung der benachbarten Körner, das Austauschfeld und das externe Feld. Wenn das effektive Feld auf jedes Korn bekannt ist, kann die Energiebarriere dieses Korns numerisch oder analytisch berechnet werden. Numerisch kann

NACHGEREICHT

die Energiebarriere durch die Verwendung der *nudged elastic band*-Methode (Dittrich2002, Henkelman2000) berechnet werden. Um Rechenzeit zu sparen, kann die Energiebarriere für verschiedene Richtungen und Stärken des effektiven Felds im Bezug auf die leichte Richtung des Korns im Voraus berechnet werden.

Für kleine magnetische Partikel, deren laterale Abmessungen kleiner als die Austauschlänge sind, kann die Energiebarriere durch die Verwendung der Näherung nach Pfeiffer (Pfeiffer1990) auch analytisch abgeschätzt werden.

Im ersten Schritt der vorgeschlagenen Methode wird wie in Abb. 1 dargestellt der Zeitschritt t_m gemäß Gl. (4) berechnet. Diese Berechnung wird für jedes Korn der magnetischen Struktur durchgeführt. Der Minimalwert all dieser Werte bestimmt t_m. Die Berechnung des Zeitschritts t_m erfordert dass alle einzelnen Energiebarrieren durch die im vorigen Absatz beschriebene Methode berechnet werden. Durch die Kenntnis dieser Energiebarrieren kann die durchschnittliche Lebenszeit τ gemäß Gl. (1) berechnet werden. Der berechnete Zeitschritt t_m wird in der folgenden Berechnung benötigt. Der folgende Programm-Quelltext, welches in der Programmiersprache C++ ausgeführt wurde, beinhaltet alle Schritte der vorliegenden Erfindung für die Berechnung des Zeitschritts t_m , welcher der Rückgabewert der Funktion *get_dt* ist.

```
double get_dt(double* tau, double probabilitySwitching, int length)
{
 double tm;
 double dt;
 for (int i=0;i<length;i++)
 {
```


NACHGEREICHT

```
    tm = - log(1-probabilitySwitching)*tau[i]/( (double)length);
    if (i==0) dt = tm;
    if (tm<dt) dt = tm;
  }
  return(dt);
}
```

Nach der Berechnung von t_m wird eine ganzzahlige Zufallszahl zwischen 1 und der Anzahl der Körner bestimmt. Diese Zahl sei mit k bezeichnet. Im nächsten Schritt muss die durchschnittliche Lebenszeit $\tau(k)$ aktualisiert werden. Dieser Schritt ist erforderlich, da bei wechselwirkenden Körnern der Wert von $\tau(k)$ vom Zustand der anderen Körner abhängt. Darüber hinaus kann die Lebenszeit auch aufgrund von zeitabhängigen äußeren Feldern, zeitlich variieren.

Als nächstes wird die Umklappwahrscheinlichkeit (P_s) des Korns k berechnet. Die Umklappwahrscheinlichkeit wird mit einer reellen Zufallszahl zwischen null und eins verglichen. Wenn die Zufallszahl kleiner als die Umklappwahrscheinlichkeit ist, wird das Korn umgekehrt. Nach der Umkehrung des Korns kann das System in seinen Gleichgewichtszustand gebracht werden, indem für eine bestimmte Zeit die Bewegungsgleichungen des magnetischen Systems gelöst werden. Dies kann durch die Ausführung einiger Zeitschritte der Landau-Lifshitz-Gilbert-Gleichung (Landau1935, Schrefl1999) geschehen.

Wie in Abb. 2 dargestellt, werden diese Schritte wiederholt bis die Zeit t größer als die Endzeit t_{final} wird.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel für die Magnetisierungsabnahme als Funktion der Zeit für ein Speichermedium. Die Anisotropiekonstante eines jeden Korns ist $K_1 = 0.3$ MJ/m³ , die Magnetisierung ist $Js = 0.5$ T. Anfänglich zeigen alle Körner in dieselbe Richtung. Es wird ein externes Feld der Stärke 0,3 T in entgegengesetzter Richtung angelegt. Abb. 4 vergleicht die Magnetisierungsabnahmen als Funktion der Zeit. Die in diesem Patent vorgestellte

NACHGEREICHT

Methode (Methode 1) wird mit der von Charap vorgeschlagenen Methode (Methode 2) verglichen. Die Ergebnisse stimmen gut überein. Jedoch ist die hier vorgestellte Methode signifikant schneller (im vorliegenden Beispiel um zwei Größenordnungen schneller), was das Simulieren von realen magnetischen Systemen, wie magnetischen Speichermedien, ermöglicht.

Die oben erörterte Methode kann zur Berechnung der Zersetzung eines Magnetisierungsmusters nach einer vorgegebenen Zeit t_{final} eingesetzt werden. Eine geeignete Kennzahl zur Beschreibung der Magnetisierungsabnahme ist die Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SRV) (Moon2000). Wenn das berechnete SRV zum Zeitpunkt t_{final} kleiner als das vorgegebene Limit ist, muss die Schichtdicke erhöht werden. Ein nicht-linearer Solver, wie die Newton-Raphson Methode, kann zur Bestimmung der minimalen Schichtdicke, welche für das Erreichen des nötigen SRV erforderlich ist, verwendet werden. Diese Information wird wie in Abb. 5 ersichtlich für die Sputter-Anlage verwendet, um die Schicht herzustellen.

NACHGEREICHT

(Brown1969) W. F. Brown, Jr., J. Appl. Phys. **39**, 993 (1968).

(Charap1997) S.. H. Charap, P.-L. Lu, and Y. He, lEEE Transactions on Magnetics **33,** 978-983 (1997).

(Dittrich2002) R. Dittrich, T. Schrefl, D. Suess, W. Scholz, H. Forster, and J. Fidler, J. Magn. Magn. Mater. **250**, 12-19 (2002).

(Henkelmann2000) G. Henkelman and H. Jónsson, J. Chem. Phys. **113,** 9978 (2000).

(Landau1935) Landau, L.D. and Lifshitz, E. Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, **8**, 153–169 (1935).

(Moon2000) J. Moon, lEEE Transactions on Magnetics **36,** 38801-3883 (2000).

(Pfeiffer1990) H. Pfeiffer, Phys. Stat. Solidi(a) **118**, 295–306 (1990).

(Schrefl1999) T. Schrefl, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **207**, 45-65, (1999).

(Sharrock1994) M. P. Sharrock, J. Appl. Phys. 76, 6413 (1994)

(Watson 1981) D. F. Watson, The Computer Journal **24(2)**, 167-172 (1981) .

NACHGEREICHT

ANSPRÜCHE

1. Eine Methode zur Berechnung und automatischen Ansteuerung einer Sputter-Anlage mit der erforderlichen Schichtdicke einer magnetischen Struktur, um ein auf einer Zeitskala größer als 1 Jahr thermisch stabiles Medium zu erhalten, welche auf der Berechnung der Zeitabhängigkeit der Magnetisierung von magnetischen Strukturen basiert, welche aus magnetischen Körnern $k = 1$ bis N aufgebaut ist, und folgende Schritte umfasst:
   Auswahl eines Korns k;
   Berechnung der durchschnittlichen Lebenszeit τ des ausgewählten Korns;
   Berechnung der Umklappwahrscheinlichkeit des ausgewählten Korns innerhalb eines Zeitschritts t_m,
   wobei t_m innerhalb eines Bereichs so gewählt wird, dass die größte Umklappwahrscheinlichkeit unter allen Körnern in einem Bereich zwischen 0,001 und 0,5 liegt.
   Berechnung einer reellen Zufallszahl (RAND) im Intervall null bis eins.
   Umklappen des magnetischen Zustands des Korns k, wenn RAND kleiner als die Umklappwahrscheinlichkeit des Korns k ist und kein Umklappen des Korns, wenn RAND größer ist als die Umklappwahrscheinlichkeit;

2. Die Methode nach Anspruch 1, welche magnetische Körner einschließt, die durch Austauschwechselwirkung gekoppelt sind.

3. Die Methode nach Anspruch 1, welche magnetische Körner einschließt, die durch Streufelder gekoppelt sind.

4. Die Methode nach Anspruch 1, die zusätzlich den Schritt enthält, zumindest einen Zeitschritt der Landau-Lifschitz-Gleichung auszuführen, nachdem zumindest ein Korn umgekehrt worden ist.

NACHGEREICHT

5. Die Methode nach Anspruch 1, mit magnetischen Körnern die durch die Voronoi-Zerlegung konstruiert worden sind.

6. Die Methode nach Anspruch 1, mit magnetischen Körnern mit lateralen Abmessungen kleiner als 100 nm.

7. Die Methode nach Anspruch 1, bei der die optimale Schichtdicke durch die Verwendung einer Newton-Raphson-Methode erhalten wird, derart, dass das Signal-Rausch-Verhältnis zu einem Zeitpunkt t_{final} grösser als der benötigte Grenzwert ist.

NACHGEREICHT

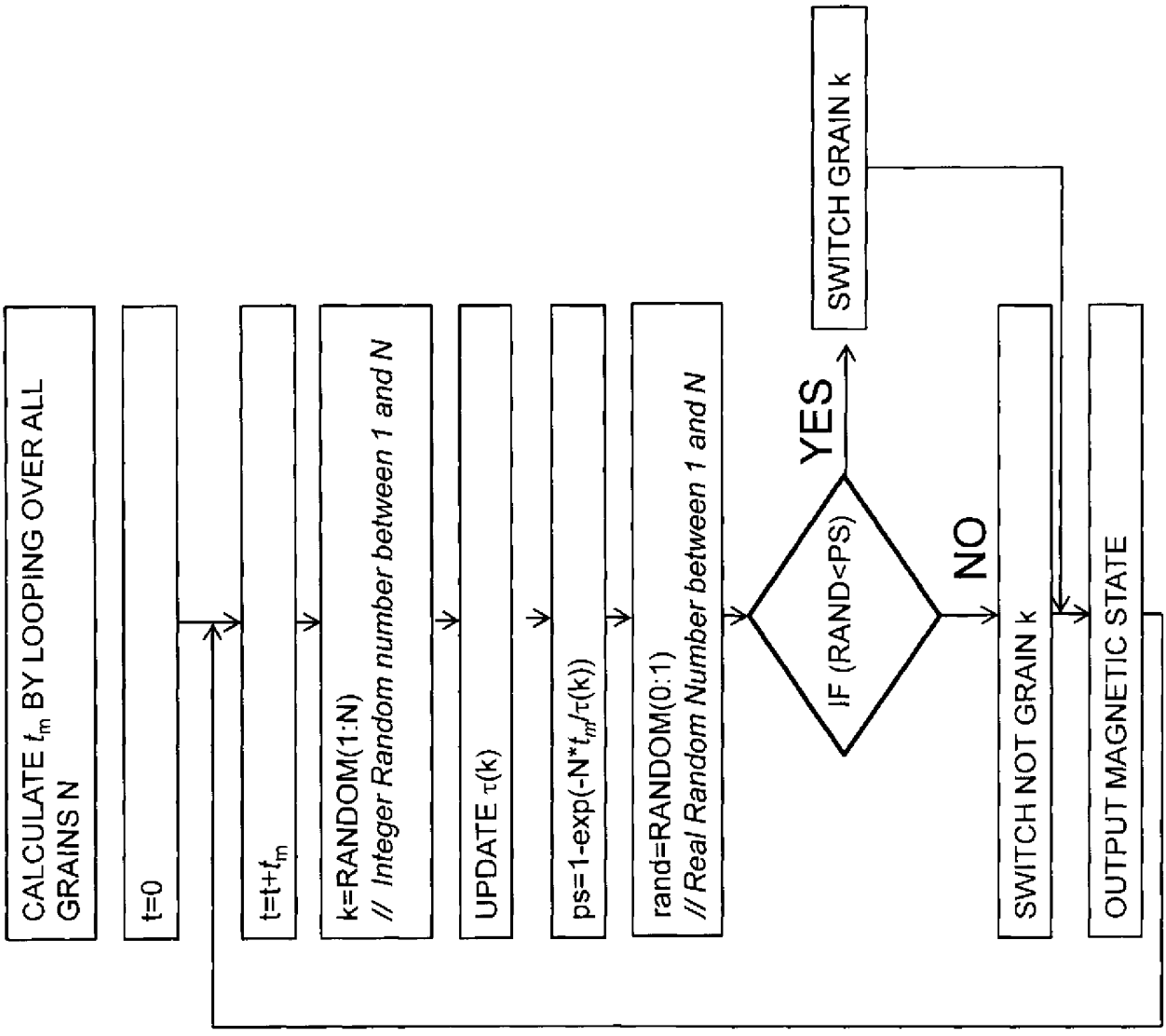


Fig. 1

NACHGEREICHT

004102

Fig. 2

NACHGEREICHT

20/402

Fig. 3

NACHGEREICHT

20140102

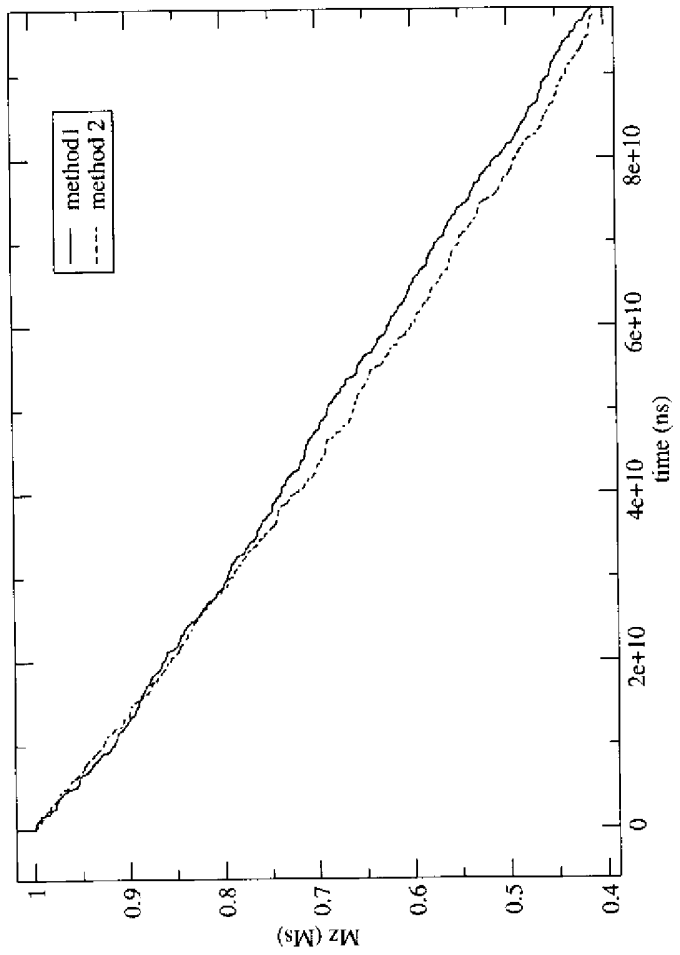


Fig. 4

NACHGEREICHT

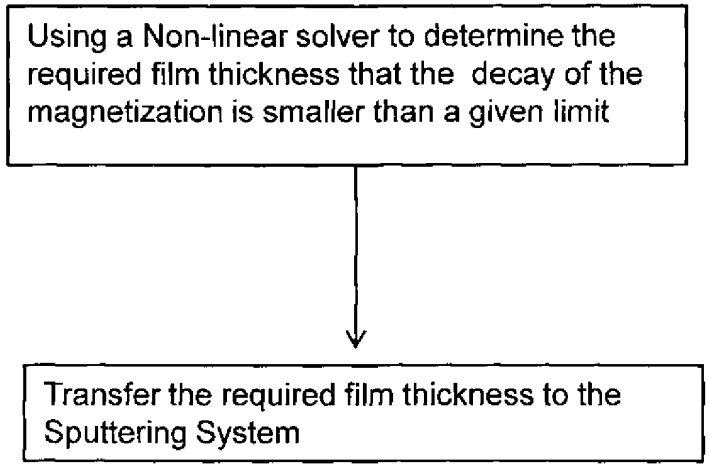


Fig. 5

NACHGEREICHT