



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 034 256 A1** 2009.01.22

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 034 256.1**

(22) Anmeldetag: **21.07.2007**

(43) Offenlegungstag: **22.01.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H03K 19/18** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Universität Bielefeld, 33615 Bielefeld, DE;  
Universität Kassel, 34125 Kassel, DE**

(74) Vertreter:

**Schneider, U., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 59423 Unna**

(72) Erfinder:

**Höink, Volker, 33611 Bielefeld, DE; Meyners, Dirk,  
53177 Bonn, DE; Reiss, Günter, 33602 Bielefeld,  
DE; Schmalhorst, Jan, 33739 Bielefeld, DE;  
Ehresmann, Arno, 66482 Zweibrücken, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu  
ziehende Druckschriften:

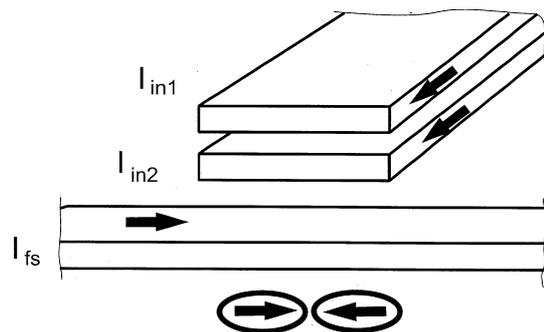
**DE 101 44 395 C1**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Rekonfigurierbare magnetische Logikschaltungsanordnung und Verfahren zur Herstellung und zum Betreiben derartiger Logikeinrichtungen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine rekonfigurierbare magnetische Logikschaltungsanordnung, aufweisend mindestens zwei magnetoresistive Elemente bestehend aus mindestens je zwei magnetischen Schichten, die jeweils durch eine Zwischenschicht voneinander getrennt sind, wobei eine der magnetischen Schichten als Referenzschicht ihre Magnetisierung unter Einfluss externer Magnetfelder nicht wesentlich und die andere magnetische Schicht als freie Schicht erfassbar ändert, sowie mindestens einem Leiter für Signalanschlüsse, mit dem im stromdurchflossenen Zustand ein die Magnetisierung der freien Schichten umschaltendes erstes Magnetfeld erzeugbar ist, wobei eine Einrichtung zur bedarfsabhängigen Erzeugung eines zweiten veränderbaren Magnetfeldes, das ebenfalls die magnetoresistiven Elemente beeinflusst. Hierbei sind zwei derartige magnetoresistive Elemente benachbart zueinander angeordnet, wobei die Magnetisierung der beiden Referenzschichten durch eine vorab eingestellte unidirektionale Anisotropie gegenläufig ausgerichtet ist und die magnetoresistiven Elemente derart miteinander verschaltet sind, das durch Einwirkung der ersten und zweiten Magnetfelder auf die magnetoresistiven Elemente aufgrund der sich ergebenden Änderungen der Ausrichtung der Magnetisierung der freien Schichten und damit des Widerstandes der magnetoresistiven Elemente an der Logikschaltungsanordnung das Schaltverhalten aller grundlegenden logischen Funktionen, insbesondere der Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR ...



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine rekonfigurierbare magnetische Logikschaltungsanordnung sowie Verfahren zur Herstellung und zum Betreiben derartiger Logikschaltungsanordnungen gemäß Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. der Ansprüche 40 und 46.

**[0002]** Bei den heute am meisten genutzten logischen Gattern, die auf Transistoren basieren, müssen die verschiedenen logischen Funktionen durch eine große Anzahl von logischen Schaltelementen simuliert werden, die jeweils nur zur Durchführung einer bestimmten Funktion geeignet sind. Typischerweise werden derartige logische Schaltelemente heute in so genannter CMOS-Technik ausgeführt, wobei der Stromlauf durch die Schaltelemente die entsprechende Logik aufgrund der Signalpegel bereitstellt. Nachteile dieser Schaltelemente in CMOS-Technik bestehen darin, dass das Ergebnis der Schaltlogik nur solange zur Verfügung steht, wie auch der Strom innerhalb der Schaltung vorhanden ist und nach Abschalten des Stroms automatisch verloren geht sowie in der festgelegten Logikfunktion des Schaltelementes.

**[0003]** Ein aussichtsreicher Ansatz zur Lösung dieser Nachteile ist eine rekonfigurierbare Logik, die kleine Anordnungen von magnetischen Schaltelementen auf Basis magnetischer Widerstandselemente (MR) benutzt. Diese haben den zusätzlichen Vorteil eines nicht flüchtigen Ausgabewertes, wie dies beispielsweise schon bei der so genannten MRAM-Technik (Magnetic Random Access Memory) technisch genutzt wird [1].

**[0004]** Die meisten derartigen Speichereinrichtungen basieren auf magnetischen Widerstandselementen, in denen der sog. Exchange-Bias-Effekt eine Rolle spielt.

**[0005]** Schon früh wurde mit dem sog. Exchange-Bias-Effekt (EB) ein Effekt gefunden, das eine gezielte Veränderung des magnetischen Verhaltens eines ferromagnetischen Materials (FM-Materials) ermöglichte. Während die Hystereseschleife eines FM-Materials normalerweise symmetrisch zum Nullpunkt des externen Feldes liegt, kann ein FM-Material in Kontakt mit einem antiferromagnetischen Material (AFM-Material) eine vom Nullpunkt verschobene Hystereseschleife aufweisen. Bei hinreichend großer Verschiebung bewirkt die magnetische Wechselwirkung mit dem AFM-Material, dass im FM-Material nur noch eine einzige im Nullfeld stabile Magnetisierungsrichtung übrigbleibt. Da diese Anisotropie in der Magnetisierungsrichtung des FM-Materials durch die Austauschwechselwirkung mit dem AFM-Material induziert wird, wird der Energieunterschied zwischen beiden Konfigurationen als Austausch-Anisotropie bezeichnet. Unter Ferromagnetismus versteht man hierbei eine parallele Ausrichtung der magnetischen Momente des Materials, die zu einer spontanen Magnetisierung unterhalb der kritischen Temperatur (Curie-Temperatur) führt. Charakteristisch für ferromagnetische Stoffe ist dabei ein Auftreten einer Remanenz und eines Hystereseverhaltens der Ummagnetisierung. Beim Antiferromagnetismus sind die magnetischen Momente unterhalb der kritischen Temperatur (der sog. Néel-Temperatur) antiparallel zueinander ausgerichtet und kompensieren sich gegenseitig.

**[0006]** Diese Austauschverschiebung tritt in Systemen aus Ferro- und Antiferromagneten auf, falls die Curie-Temperatur des Ferromagneten größer als die Néel-Temperatur des Antiferromagneten ist und das System entweder im Magnetfeld hergestellt oder im Magnetfeld unter die Blocking-Temperatur gekühlt wird. Der Ferromagnet zeigt dann eine auf der Magnetfeldachse verschobene Hystereseurve, d. h. der Ferromagnet verhält sich so, als ob er einem inneren Verschiebungsfeld ausgesetzt wäre. Die Ursache für dieses Verschiebungsfeld liegt in der Austauschkopplung zwischen den antiferromagnetischen und ferromagnetischen Spins an der Grenzfläche, daher auch der Name Austauschverschiebung. Grundsätzlich kann das Auftreten einer solchen Austauschverschiebung wie folgt beschrieben werden. Befindet sich das System oberhalb der Néel-Temperatur, so sind die antiferromagnetischen Spins frei beweglich und werden sich an der Grenzfläche zwischen FM und AFM beispielsweise parallel zu den durch das äußere Feld ausgerichteten Spins des Ferromagneten ausrichten. Kühlt man nun das System unter die Néel-Temperatur, so „frieren“ die antiferromagnetischen Spins ein und wirken nun umgekehrt nach dem Entfernen des äußeren Feldes wiederum durch die Austauschkopplung auf den Ferromagneten wie ein inneres Verschiebungsfeld.

**[0007]** Für viele Systeme aus Ferro- und Antiferromagnet liegt die Néel-Temperatur des AFM deutlich unterhalb der Curie-Temperatur des FM. Kühlt man ein solches System in einem äußeren Feld oder mit aufmagnetisiertem FM unter die Blocking-Temperatur des Antiferromagneten, tritt ein Exchange Bias auf, also die Verschiebung der Hystereseurve. Meist geht damit auch eine Verbreiterung der Hysterese einher. Heute werden hierfür vor allem Dünnschichtsysteme verwendet, die eine bessere Kontrolle der Wachstumsparameter (Grenzflächenrauigkeit, Körnigkeit, Orientierung) erlauben und eindeutig relevanter für Anwendungen sind.

**[0008]** Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die magnetische Widerstandselemente technisch umzusetzen.

Sind die beiden ferromagnetischen Schichten durch ein unmagnetisches Metall getrennt, so erhält man ein Riesenmagnetowiderstandssystem (Giant-Magneto-Resistance-System (GMR)). Der elektrische Widerstand senkrecht oder parallel zur Schichtebene hängt in diesem System stark von der Orientierung der Magnetisierungen der beiden Ferromagneten zueinander ab. GMR-Elemente werden beispielsweise in Festplattenleseköpfen benutzt. In Tunneling-Magneto-Resistance-Elementen (TMR-Elementen) werden die beiden ferromagnetischen Schichten dagegen durch einen unmagnetischen Isolator getrennt. Der Tunnelstrom senkrecht zur Schichtebene hängt von der Ausrichtung der beiden Magnetisierungen zueinander ab.

**[0009]** Technologisch interessant ist der Exchange Bias, da er z. B. in Spin-Valve-Systemen eine wichtige Rolle spielt. Diese Systeme enthalten zwei Ferromagneten, von denen sich einer frei ummagnetisieren kann, während der andere als Referenz festgehalten wird. Dieses „Pinnen“ der Referenzschicht erfolgt z. B. durch die Kopplung an einen Antiferromagneten.

**[0010]** Die seitliche Verschiebung der Hystereseschleife, die nur einer der Effekte der FM-AFM-Wechselwirkung ist, wird bereits seit ein paar Jahren in technologischen Anwendungen, unter anderem im Bereich der Datenspeicherung, verwendet. Bei der aktuellen Generation von Festplattenleseköpfen wird ein Schichtsystem verwendet, welches unter anderem zwei ferromagnetische und eine antiferromagnetische Schicht zur Optimierung der Lesekopfeigenschaften enthält. Durch die antiferromagnetische Schicht wird die Magnetisierung einer der beiden ferromagnetischen Schichten durch den Exchange-Bias-Effekt in einer genau definierten Richtung festgehalten (das ist das schon angesprochene „pinning“). Die Magnetisierung der zweiten ferromagnetischen Schicht ist frei drehbar und wird durch die geschriebenen Bits auf der Festplatte ausgerichtet. Gemessen wird dann ein Signal, das von der relativen Orientierung der beiden ferromagnetischen Schichten zueinander abhängt.

**[0011]** Auch für die Herstellung rekonfigurierbarer magnetischer Schaltungsanordnungen ist die EB schon beschrieben worden.

**[0012]** Ein Beispiel für eine auf magnetischen Schaltelementen basierende konfigurierbare Logik, welche aus sechs magnetic tunnel junctions (MTJ) pro Logikeinheit besteht, ist in [2] beschrieben worden. Dieser Entwurf kann für alle Grundlogikfunktionen außer XOR verwendet werden.

**[0013]** Aus der DE 100 53 206 C1 und in Weiterführung aus der DE 101 13 787 C1 sind Logikschaltungsanordnungen mit mindestens einem magnetoresistiven Element bekannt, dem ein Leiter mit mindestens zwei Signalanschlüssen zugeordnet ist, mittels dessen im stromdurchflossenen Zustand ein auf das magnetoresistive Element einwirkendes Magnetfeld erzeugbar wird, wobei mittels des Magnetfeldes die Magnetisierung einer weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elementes umschaltbar wird. Hierbei sind in der Logikschaltungsanordnungen Mittel zur bedarfsabhängigen Erzeugung eines im wesentlichen senkrecht zur Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht stehenden weiteren Magnetfeldes vorgesehen, mit denen die Betriebsart und damit die Logik der Logikschaltungsanordnung verändert werden kann. Durch das zusätzliche Magnetfeld wird die zum Drehen beziehungsweise Umschalten der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht erforderliche Koerzitivfeldstärke verringert und damit reicht schon ein geringeres Magnetfeld zum Umschalten der weichmagnetischen Schicht. Abhängig von den beiden Signalen für die Ansteuerung der Logikschaltungsanordnung wird dann eine Antwort der Logikschaltungsanordnung abhängig von dem zusätzlichen Magnetfeld erzeugt und kann weiterverarbeitet werden. Gemäß der DE 101 13 787 C1 kann das zusätzliche magnetische Feld auch direkt über eine Magnetwirkung ohne einen Stromfluss realisiert werden.

**[0014]** Aus der DE 102 55 857 B3 ist eine magnetische Logikeinrichtung sowie ein Verfahren zum Betrieb einer solchen Logikeinrichtung bekannt, bei der die Logikeinrichtung vor der Operation mit einem bestimmten Operator-Steuersignal auf einen Startzustand zur Ausführung der Operatorfunktion eingestellt wird und das Operator-Steuersignal aus einer Gruppe von verschiedenartigen Steuersignalen ausgewählt wird, mit denen verschiedene nicht flüchtige Startzustände der Logikeinrichtung gezielt eingestellt werden, die jeweils für bestimmte logische Funktionen charakteristisch sind. Hierbei wird die Logikeinrichtung aus einzelnen, nicht miteinander verkoppelten Logikelementen gebildet, die jeweils vor jeder Ausführung eines Logikschrittes umständlich und aufwändig in einen entsprechenden Betriebszustand umgeschaltet werden müssen. Auch ist der Umfang der zur Verfügung stehenden Logikfunktionen begrenzt.

**[0015]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Logikschaltungsanordnung und Verfahren zur Herstellung und zum Betrieb derartiger Logikschaltungsanordnungen anzugeben, mit der mit Hilfe eines eigenständigen Logikschaltungsbausteins alle für die praktische Nutzung notwendigen Logikschaltungen auf einfache Weise erzeugt und wahlweise benutzt werden können.

**[0016]** Die Lösung der erfindungsgemäßen Aufgabe ergibt sich hinsichtlich der Logikschaltungsanordnung aus den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruches 1 und hinsichtlich der Verfahren aus den kennzeichnenden Merkmalen der Ansprüche 40 bzw. 46 in Zusammenwirken mit den Merkmalen des zugehörigen Oberbegriffes. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

**[0017]** Die Erfindung hinsichtlich der Schaltungsanordnung geht aus von einer rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnung, aufweisend mindestens zwei magnetoresistive Elemente bestehend aus mindestens je zwei magnetischen Schichten, die jeweils durch eine Zwischenschicht voneinander getrennt sind, wobei eine der magnetischen Schichten als Referenzschicht ihre Magnetisierung unter Einfluss externer Magnetfelder nicht wesentlich und die andere magnetische Schicht als freie Schicht ihre Magnetisierung unter Einfluss externer Magnetfelder erfassbar ändert, sowie mindestens einem Leiter für mindestens zwei Signalanschlüsse, mit dem im stromdurchflossenen Zustand ein auf die magnetoresistiven Elemente einwirkendes und die Magnetisierung der freien Schichten umschaltendes erstes Magnetfeld erzeugbar ist, sowie eine Einrichtung zur bedarfsabhängigen Erzeugung eines zweiten veränderbaren Magnetfeldes, das ebenfalls die magnetoresistiven Elemente beeinflusst. Eine derartige Schaltungsanordnung wird dadurch in erfindungsgemäßer Weise weiter entwickelt, dass zwei derartige magnetoresistive Elemente benachbart zueinander angeordnet sind, wobei die Magnetisierung der beiden Referenzschichten durch eine vorab eingestellte unidirektionale Anisotropie gegenläufig ausgerichtet ist und die magnetoresistiven Elemente derart miteinander verschaltet sind, dass durch Einwirkung der ersten und zweiten Magnetfelder auf die magnetoresistiven Elemente aufgrund der sich ergebenden Änderungen der Ausrichtung der Magnetisierung der freien Schichten und damit des Widerstandes der magnetoresistiven Elemente an der Logikschaltungsanordnung das Schaltverhalten aller grundlegenden logischen Funktionen, insbesondere der Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR oder XNOR, hervorgerufen ist. Hierdurch ist es mit einer einfachen Verschaltung zweier magnetoresistiver Elemente sowie aufgrund der gegenläufigen Magnetisierung der Referenzschichten dieser beiden magnetoresistiven Elemente unter Beachtung der sich ergebenden, verschobenen Hysteresekurven jedes der magnetoresistiven Elemente möglich, alle technisch relevanten logischen Funktionen wie die Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR oder XNOR mit der gleichen Schaltung hervorzurufen, indem das jeweilige Magnetisierungsverhalten der magnetoresistiven Elemente durch Magnetwirkungen der Signalströme sowie eines zweiten wahlweise steuerbaren Magnetfeldes beeinflusst wird und sich das gewählte Antwortverhalten der Logikschaltungsanordnung ohne großen Aufwand je nach Bedarf entsprechend einrichten lässt. Hierbei ist die gegenläufige Magnetisierung der Referenzschichten der magnetoresistiven Elemente von großer Bedeutung, da durch sie in Kombination mit den Wirkungen der extern angelegten Magnetfelder eine gezielte Beeinflussung der Magnetisierungseigenschaften der magnetoresistiven Elemente herbeigeführt werden kann, da hierdurch eine Verschiebung der Hysteresekurven der freien FM-Schichten der einzelnen magnetoresistiven Elemente zueinander erreichbar ist, mit der bei geeignetem Durchlaufen unter Einfluss der extern hervorgerufenen ersten und zweiten Magnetfelder das Zusammenwirken der magnetoresistiven Elemente in der Schaltungsanordnung wahlweise passend für die jeweils benötigte Logikschaltung beeinflusst werden kann. Damit ist es mit nur einer Schaltung möglich, alle benötigten Logikfunktionen zu realisieren, die selbstverständlich auf entsprechenden Schaltungseinheiten vielfach vorgesehen werden können und damit eine leistungsfähige reprogrammierbare Logikschaltungsanordnung bilden können. Gleichzeitig ist das Ergebnis einer Schaltung mit der Schaltungsanordnung nichtflüchtig und kann ohne Stromzufuhr lange Zeit erhalten bleiben.

**[0018]** Von Vorteil ist es weiterhin, wenn die Einrichtung zur bedarfsabhängigen Erzeugung des zweiten veränderbaren Magnetfeldes einen bestrombaren Leiter umfasst, dessen Lage senkrecht zu dem Leiter für die mindestens zwei Signalanschlüsse ausgerichtet ist. Hierbei kann im Bereich der Logikschaltungsanordnung ein magnetisch wirksames Element angeordnet sein, vorzugsweise der oder die Leiter für die mindestens zwei Signalanschlüsse des zweiten veränderbaren Magnetfeldes ein solches magnetisch wirksames Element umfassen, dessen Magnetfeld parallel oder antiparallel zu der Magnetisierung der Referenzschicht der magnetoresistiven Elemente ausgerichtet ist. Die Erzeugung des zweiten magnetischen Feldes für Logikfunktionsauswahl kann wie auch die Erzeugung der ersten Magnetfelder für die Signale z. B. durch externe Spulen erfolgen, wobei das dadurch hervorgerufene zweite Magnetfeld parallel der kurzen Achse der vorzugsweise elliptisch geformten magnetoresistiven Elemente verlaufen kann. Denkbar wäre auch der Einsatz von Mikroelektronisch-mechanischen Systemen (MEMS), wie sie heute z. B. für Spiegelarrays in Projektoren entwickelt werden, in Verbindung mit winzigen Permanentmagneten oder der parallele Einsatz einer großen Anzahl von magnetischen Spitzen wie man sie im MFM (magnetic force microscope) benutzt. Grundsätzlich denkbar wäre auch eine Erzeugung von magnetischen Feldern durch andere Techniken wie etwa die Magnetostriktion.

**[0019]** Von Wichtigkeit ist es weiterhin, dass das erste und das zweite magnetische Feld sich bezüglich der Schaltung der magnetoresistiven Elemente derart überlagern, dass sich wahlweise das Schaltverhalten aller grundlegenden logischen Funktionen, insbesondere der Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR oder XNOR,

an der Schaltung der magnetoresistiven Elemente einstellen lässt. Die wechselseitige Beeinflussung der sich überlagernden ersten und zweiten Magnetfelder sowie die daraus resultierende Beeinflussung des magnetischen Verhaltens der magnetoresistiven Elemente kann dann dazu genutzt werden, durch das Hystereseverhalten der Schaltung der z. B. seriell oder parallel miteinander verschalteten magnetoresistiven Elemente den jeweils gewünschten Betriebszustand der Logikschaltungsanordnung einzustellen, indem die Schaltschwellen der magnetoresistiven Elemente durch ein oder beide Signale überwunden oder nicht überwunden werden. Durch das zweite Magnetfeld können die Schaltschwellen dabei je nach gewählter Logikfunktion gezielt derart beeinflusst werden, dass sich unter Wirkung dieses zweiten Magnetfeldes nur die jeweils gewünschte Logikschaltung einstellen kann.

**[0020]** Von Vorteil ist es weiterhin, wenn die magnetischen Schichten der magnetoresistiven Elemente aus ferromagnetischen Materialien, etwa hartmagnetischem Material für die Referenzschichten und weichmagnetischem Material für die freien Schichten gebildet sind. Hierfür können als ferromagnetische Materialien vorteilhaft CoFe, NiFe, CoFeB oder Heusler-Verbindungen Verwendung finden. Bei magnetischen Tunnелеlementen (MTJs, magnetic tunnel junctions) mit MgO-Barriere ist zur Zeit CoFeB sehr beliebt, da mit gesputterten CoFeB-Schichten hohe Effektamplituden erreicht wurden (siehe z. B. J. Hayakawaa in Appl. Phys. Lett. 89, 232510 (2006)). Ebenfalls sehr erfolgreich waren Fe/MgO/Fe-Systeme (siehe z. B. S. S. P. Parkin in nature materials, Vol. 3, 826 (2004)). Vielversprechend sind auf Grund der hohen erwarteten Spinpolarisation auch Heusler-Verbindungen.

**[0021]** Insbesondere, wenn die Zwischenschicht eine Isolatorschicht ist, können als Isolatorschichtmaterial Magnesiumoxid MgO oder Aluminiumoxid  $Al_2O_3$  Verwendung finden, wobei dann die magnetoresistiven Elemente Tunnel-magnetische Widerstandselemente (TMR-Elemente) sind. Typische technisch verwendbare Schichtstapel für den Einsatz in TMR-Elementen bestehen etwa aus Cu 25 nm (untere Zuleitung)/ $Mn_{83}Ir_{17}$  12 nm (für Exchange Bias)/ $Co_{70}Fe_{30}$  3 nm (Referenzschicht)/Al 1.3 nm + plasma Oxidation als Barriere/ $Ni_{80}Fe_{20}$  4 nm (zweite FM Elektrode) sowie als obere Schutzschichten Ta 3 nm/Cu 47 nm/Au 26 nm. Bei der Auswahl der Werkstoffe ist es vorteilhaft, wenn sich je nach erstem Magnetfeld eine in etwa parallele oder antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen ergibt. Man kann weiterhin auch einzelne Materialien austauschen, zusätzliche Pufferschichten für besseres Wachstum hinzufügen, einzelne ferromagnetische Schichten gegen künstliche Ferrimagneten (bestehend aus 2 mittels Zwischenschichtaustauschkopplung antiparallel gekoppelten FM Schichten) austauschen, um ein geringeres magnetisches Nettomoment zu erhalten (dies ist z. B. von W. J. Gallagher et al. in IBM J. RES. & DEV. VOL. 50, 5 (2006) beschrieben), eine zweite Barriere und eine weitere ferromagnetische Schicht hinzufügen und viele andere Veränderungen vornehmen, wie dies auch in der verschiedenen Literatur über derartige magnetische Schichtaufbauten häufig beschrieben ist. Wesentlich ist aber immer die Abfolge Ferromagnet/Isolator/Ferromagnet.

**[0022]** Denkbar ist es auch, dass die Zwischenschicht eine unmagnetische Metallschicht ist und die sich damit ergebenden magnetoresistiven Elemente Giant-magnetische Widerstandselemente (GMR-Elemente) sind. Bei einem derartigen Spinvalve kann der wesentliche Aufbau aus einem Antiferromagnet/Ferromagnet/Nichtmagnet/Ferromagnet bestehen, wobei der Teil Antiferromagnet/Ferromagnet für das Pinning zuständig ist. Alternativ kann man auch auf den Antiferromagneten verzichten und die antiparallele Ausrichtung der beiden Ferromagneten durch eine passende Wahl der Zwischenschichtdicke und die daraus resultierende antiferromagnetische Zwischenschichtaustauschkopplung erreichen. Da das aber symmetrische MR-Kurven zur Folge hat, ist es für diese Logik dann nur bedingt zu gebrauchen.

**[0023]** Weiterhin ist es auch denkbar, dass das im wesentlichen unveränderliche magnetische Verhalten der Referenzschichten der magnetoresistiven Elemente durch zusätzliche magnetische Schichten mit einer starken unidirektionalen Anisotropie und/oder einer hohen Koerzitivfeldstärke stabilisierbar ist, die über eine nichtmagnetische Schicht antiferromagnetisch an den Referenzschichten ankoppelbar ist. Hierbei kann die gegenläufige Magnetisierung der Referenzschichten ebenfalls vorab durch die noch nachstehend für einfache Referenzschichten beschriebenen Verfahren wie etwa mittels Ionenbeschuss erfolgen, wobei sich durch den Ionenbeschuss eine antiferromagnetische Kopplung in eine ferromagnetische Kopplung umwandeln kann. Wichtig ist hierbei insbesondere, dass die unidirektionale Anisotropie der Referenzschichten der beiden magnetoresistiven Elemente gegenläufig ausgerichtet ist. Hinsichtlich des Festhaltens der Magnetisierungsrichtung der Referenzschicht durch Exchange Bias gilt, dass die Magnetisierungsrichtung einer ferromagnetischen Schicht bei den im Betrieb zu erwartenden externen Magnetfeldern fest sein sollte. Diese Richtung muss sich dabei lokal variieren lassen. Man könnte z. B. eine ferromagnetische Schicht mit großer uniaxialer Kristallanisotropie und sehr großem Koerzitivfeld wählen, welche ihre Magnetisierungsrichtung bei den vorkommenden externen Magnetfeldern nicht verändert. Daran könnte man die eigentliche Referenzschicht des magnetoresistiven Elementes antiparallel mittels Interlayer-Austauschwechselwirkung koppeln. Das ist z. B. durch eine Rutheni-

um-Zwischenschicht von ca. 1 nm Dicke möglich. Beschießt man dieses System lokal mit hohen Dosen von z. B. He-Ionen, so verwandelt sich die antiparallele Kopplung in eine parallele Kopplung (das wurde für verschiedene Materialkombinationen schon gezeigt). Dadurch erreicht man die gewünschte lokale Variation der Magnetisierungsrichtung der Referenzschicht. Denkbar ist aber auch der Einsatz jeder anderen Form unidirektionaler Anisotropie.

**[0024]** Von Wichtigkeit ist es weiterhin, wenn die Feldstärke am Ort der miteinander verschalteten magnetoresistiven Elemente im wesentlichen gleich ist, da hierdurch ein gleichmäßiges Verhalten der beiden magnetoresistiven Elemente hervorgerufen wird.

**[0025]** In einer ersten Ausgestaltung ist es denkbar, dass die Eingabesignale auf die Schaltung der magnetoresistiven Elemente durch mindestens einen, vorzugsweise auch zwei parallele Leiter aufgeprägt werden, auf dem einzeln oder gleichzeitig unterschiedliche Stromstärken für die unterschiedlichen Signalpegel einer logischen „0“ oder einer logischen „1“ auf die Schaltung der magnetoresistiven Elemente aufgegeben werden. Die beiden Signalpegel addieren sich und rufen eine Magnetfeldwirkung um den oder die Leiter hervor, die das gewünschte Schaltverhalten bedingen. Hierbei sollte in weiterer Ausgestaltung das durch den oder die Leiter erzeugte magnetische Feld parallel zu der Magnetisierungsrichtung der Referenzschichten ausgerichtet sein. Hieraus resultiert ein Magnetfeld derart, dass sich ein negatives Feld bei einem negativen Strom beider Signale, ein Nullfeld mit einem positiven oder negativen Strom bei jeweils einem der beiden Signale und ein positives Feld bei einem positiven Strom gleichzeitig für beide Signale einstellt.

**[0026]** Anstatt der einfachen stromdurchflossenen Leiter zur Einkopplung der passend zu dem Signalzustand hervorgerufenen Magnetfelder können auf den mindestens einen Leiter zur Aufprägung der Eingabesignale auch gepinnte hardmagnetische Bahnen derart aufgebracht sein, dass sich ein Streufeld gleicher Amplitude, aber gegenläufiger Ausrichtung zu dem magnetischen Feld ergibt, das sich aufgrund eines Stromflusses durch den Leiter ergeben würde. Hierbei kann das Streufeld durch die Dicke der gepinnten hardmagnetischen Bahnen und die Richtung des Pinnens hinsichtlich der Ausbildung festgelegt werden. Für die Aufprägung der Signale sind in diesem Fall keine bipolaren Ströme notwendig.

**[0027]** Weiterhin ist es auch denkbar, dass anstelle positiver oder negativer Schaltschwellen unterschiedliche positive Magnetfeldstärken für die Darstellung der einzelnen Schaltantworten der Schaltung der magnetoresistiven Elemente verwendet werden. Ebenfalls ist es denkbar, dass eine Differenz zwischen der Leitfähigkeit oder dem Widerstand der beiden magnetoresistiven Elemente eine Schaltantwort der Schaltung der beiden magnetoresistiven Elemente angibt, wobei keine Differenz hinsichtlich Leitfähigkeit oder Widerstand zwischen den beiden magnetoresistiven Elementen als logische „0“ und eine hohe Widerstandsdifferenz als logische „1“ verstanden werden kann.

**[0028]** Von Wichtigkeit ist es hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Schaltzustände der Logikschaltungsanordnung, dass die Schaltung der magnetoresistiven Elemente vor jedem Schaltvorgang in einen definierten Ausgangszustand geschaltet wird. Hierfür wird ein definierter Ausgangszustand durch eine positive oder eine negative Sättigung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente eingestellt, von dem ausgehend dann das tatsächliche Schaltverhalten der Logikschaltungsanordnung ausgewählt und durch die Wirkung des zweiten Magnetfeldes eingestellt wird.

**[0029]** Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Herstellung einer rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, bei dem vor, während oder nach der Herstellung der magnetoresistiven Elemente eine gezielte Ausrichtung der Magnetisierung der Referenzschichten zumindest abschnittsweise in den Bereichen hergestellt wird, in denen magnetoresistive Elemente angeordnet sind, und vor, während oder nach der vollständigen oder teilweisen Herstellung der magnetoresistiven Elemente bei festlegbaren magnetoresistiven Elementen oder in den Bereichen, in denen magnetoresistive Elemente angeordnet werden, die Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht geändert wird. Es ergeben sich hierbei verschiedene mögliche Methoden der Herstellung der magnetoresistiven Elemente und deren gezielte Ausrichtung bezüglich der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht. Denkbar ist insbesondere eine einheitliche Herstellung des Pinning auf der gesamten Platine (Deposition im Feld oder Abkühlen im Feld nach der Herstellung der MTJ-Schichten) und ein anschließendes vollständiges Herstellen der MTJ-Schichten. Das Pinning wird dann nachträglich mittels Ionenbeschuss oder Laser manipuliert. Alternativ kann auch eine einheitliche Herstellung des Pinning auf der gesamten Platine erfolgen (z. B. Deposition im Feld oder Abkühlen im Feld frühestens nach Deposition der Referenzschicht) und eine anschließende teilweise Herstellung der MTJ-Schichten (z. B. bis zur Referenzschicht), anschließend wird dann das Pinning mittels Ionenbeschuss oder Laser manipuliert und danach der Rest der MTJ hergestellt (dies kann z. B. zur Schonung der Barriere

eingesetzt werden). Weiterhin ist es denkbar, ein Pinning auf der Platine zunächst nicht zu initialisieren, sondern zunächst die MTJ vollständig oder teilweise herzustellen und das Pinning während des Herstellungsprozesses (z. B. nach der Deposition der Referenzschicht) oder nachträglich nach der vollständigen Herstellung der MTJ-Schichten in zwei Durchgängen mittels Ionenbeschuss oder Laser zu manipulieren. Dabei werden zunächst alle MTJ mit der einen und anschließend alle mit der anderen Pinningrichtung behandelt. Dies hätte den Vorteil, dass alle Tunnelelemente mit der selben Ionendosis beschossen werden und somit eine gleiche TMR- bzw. Widerstandsänderung zeigen sollten. Ebenfalls wäre es denkbar, mittels getrennter Schichtabscheidung im Magnetfeld von vorneherein die Pinningrichtung der beiden MTJ-Typen antiparallel auszurichten. Bei allen vorgenannten Vorgehensweisen können etwa bekannte Schritte üblicher lithographischer Verfahren und Ätzverfahren für die Herstellung der magnetoresistiven Elemente z. B. auf Dünnschichtschaltungen genutzt werden und gleichwohl etwa jedes zweite oder auch jedes n-te magnetoresistive Elemente mit einer gegenläufigen Magnetisierung der Referenzschicht versehen werden, um in einer Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1 Verwendung zu finden. Denkbar ist hierbei die selektive Änderung der Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht durch Ionenbeschuss in einem Magnetfeld, durch lokale Erwärmung der Referenzschicht, vorzugsweise durch einen Laser, in einem Magnetfeld, durch getrenntes Sputtern von Teilen der magnetoresistiven Elemente in entgegengesetzten äußeren Magnetfeldern sowie durch weitere hierzu geeignete Verfahren. Bei vollflächig arbeitenden Verfahren wie etwa dem Ionenbeschuss kann durch Abdecken nicht zu verändernder Abschnitte der nicht zu verändernden magnetoresistiven Elemente, vorzugsweise durch Abdeckmasken oder dgl. eine gezielte Auswahl der zu verändernden magnetoresistiven Elemente erfolgen.

**[0030]** Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zum Betrieb einer rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, bei dem beim Betrieb der Schaltung der beiden magnetoresistiven Elemente vor jedem Schaltvorgang als erstes die freien Schichten der magnetoresistiven Elemente negativ oder positiv gesättigt werden, danach das magnetische Feld zur Auswahl der Logikfunktion eingestellt und/oder die Logiksignale auf den mindestens einen Leiter aufgegeben und damit die Magnetisierung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente verändert und die logische Antwort der Schaltung ermittelt wird. Diese Abfolge gewährleistet definierte Schaltzustände der Logikschaltungsanordnung für jeden Zyklus der Magnetisierung und das Ergebnis der Logikschaltung ist daher unabhängig von vorhergehenden Zyklen. Hierbei kann weiterhin die Sättigung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente auch abhängig von der einzustellenden Logikfunktion der Schaltung der magnetoresistiven Elemente gewählt werden, um das Magnetisierungsverhalten der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente zu optimieren. Von Vorteil ist es, wenn der mindestens eine Leiter zur Zuführung der Eingangssignale dabei auch zur Zuführung der Sättigung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente genutzt wird.

**[0031]** Es sollte auch darauf geachtet werden, dass vor den Abschalten der Logiksignale das magnetische Feld zur Auswahl der Logikfunktion abgeschaltet wird, um eine Nichtflüchtigkeit des erzeugten Schaltergebnisses zu gewährleisten.

**[0032]** Von Vorteil ist es weiterhin, wenn zur Erzeugung des magnetischen Feldes für die Auswahl der Logikfunktion sowie für die Logiksignale getaktete Ströme benutzt werden.

**[0033]** Auch ist es denkbar, dass die gleichartigen Logikschaltungsanordnungen auf der gemeinsamen Logikschaltung je nach Einstellung gleichzeitig unterschiedliche oder auch gleichzeitig gleiche logische Funktionen ausführen.

**[0034]** Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung zeigt die Zeichnung.

**[0035]** Es zeigen:

**[0036]** [Fig. 1](#) – Eine schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus einer erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung für eine rekonfigurierbare magnetische Logik, die aus zwei elliptischen MTJ mit gegenläufiger Richtung des EB besteht,

**[0037]** [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) – Schaltasteroiden für verschiedene Schaltzustände der Logikschaltungsanordnung gemäß [Fig. 1](#),

**[0038]** [Fig. 3](#) – Schaltasteroiden für Schaltzustände ausschließlich bei positiven Eingabesignalströmen,

[0039] **Fig. 4** – Schematische Darstellung des Durchlaufs durch einen Schaltasteroiden im Zuge eines Logikschaltzyklus,

[0040] **Fig. 5** – Verschiebung des Bereiches geringen Widerstandes durch Variation der Feldstärke des Funktionsauswahlfeldes nach einer Sättigung mit einem negativen Feld,

[0041] **Fig. 6** – Schematischer Aufbau der Schichten und der Verschaltung der MTJ der erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung,

[0042] **Fig. 7** – Minor loops eines mit Ionen bestrahlten, eines nicht mit Ionen bestrahlten MTJ und einer Serienschaltung dieser beiden MTJ,

[0043] **Fig. 8** – Minor loops der mit Ionen bestrahlten und der nicht mit Ionen bestrahlten MTJ in einer Serienschaltung,

[0044] **Fig. 9** – Gemessene Schaltasteroiden eines mit Ionen bestrahlten und eines nicht mit Ionen bestrahlten MTJ,

[0045] **Fig. 10a–d** – Verschiedene Schaltabläufe und Messwerte für die Funktionen NAND, OR und XOR.

[0046] Die erfindungsgemäße Logikschaltungsanordnung für eine rekonfigurierbare magnetische Logik ist rein schematisch in **Fig. 1** gezeigt. Der Hauptteil dieser Logikschaltungsanordnung besteht aus zwei miteinander verschalteten MTJ mit einer entgegengesetzten Magnetisierungsrichtung der von der Exchange-bias-Interaktion (EB) herbeigeführten unidirektionalen Anisotropie. Hierbei deuten die Pfeile in den Ellipsen schematisch die Richtung der Magnetisierung der gepinnten Referenzschichten aufgrund der unidirektionalen Anisotropie an. Hieraus resultiert eine entgegengesetzt orientierte Magnetisierung der zwei Referenzschichten für die relativ kleinen externen magnetischen Felder, die gebraucht werden, während das Hystereseverhalten der magnetoresistiven Elemente mittels minor loops gemessen wird. Um diesen Ansatz zu realisieren, kann bei der Herstellung der magnetoresistiven Elemente die Richtung des EB zuerst homogen auf der gesamten Probe gesetzt werden, z. B. während des Sputterns durch Feldwachstum oder durch ein zusätzliches Abkühlen in einem Magnetfeld nach dem Sputtern. Dann kann die Richtung der EB für einen der MTJ vorteilhaft durch Ionenbeschuss um  $180^\circ$  gedreht werden. Dadurch ist es möglich, zwei elliptische MTJ mit einer remanenten gegenläufigen Richtung der Magnetisierung der Referenzschichten (nur als Pfeile in **Fig. 1** gekennzeichnet) mit den üblichen lithographischen Verfahren und Ätzverfahren zu erhalten. Dies kann beispielsweise auch selektiv für jeden der auf der Probe angeordneten MTJ etwa durch Abdecken mittels Masken eingestellt werden.

[0047] Zueinander orthogonale Leiter im Bereich der MTJ machen es dabei möglich, abhängig von Signalzuständen und der gewünschten Logik magnetische Felder zu erzeugen, die sowohl zu der Hauptachse als auch der Nebenachse jedes elliptischen MTJ parallel ausgerichtet sind. Die Feldstärke der magnetischen Felder sollte bei beiden MTJ identisch sein. Die logischen Eingangsgrößen der Logikschaltungsanordnung können dabei in Form von Strömen  $I_{in1}/I_{in2}$  auf die zueinander parallelen oberen Leiter in **Fig. 1** gegeben werden. Hier stellen positive Ströme das Eingangssignal „1“, negative Ströme das Eingangssignal „0“ dar. Das um die Leiter entstehende magnetische Feld ist in der Richtung der langen Achse der MTJ orientiert. Die Überlagerung der zwei magnetischen Felder führt zu einem negativen Feld für (0,0), einem Nullfeld für (1,0) und (0,1) und einem positiven Feld für (1,1) (vergleiche **Fig. 2a** und b).

[0048] Eine zusätzliche Möglichkeit besteht darin, gepinnte hartmagnetische FM-Streifen auf die Leiter für den Strom  $I_{in}$  aufzubringen. Die Dicke der FM-Streifen und die Richtung des Pinnens sollte derart gewählt werden, dass ein Streufeld mit derselben Amplitude, aber der gegenläufigen Richtung des magnetischen Felds entsteht, das von dem Strom  $I_{in}$  hervorgerufen wird, der durch die Leiter fließt. Dies führt zu einem entsprechenden magnetischen Feld bei (0,0) in **Fig. 2** für einen Nullstrom durch beide Leiter, einem Nullfeld für einen positiven Strom durch nur einen Leiter ((1,0)/(0,1)) und einem positiven Feld für positive Ströme durch beide Leiter (1,1). Dies hat den Vorzug, dass überhaupt keine bipolaren Ströme erforderlich sind. Die dritte Möglichkeit für diese Art von magnetischer Logik ist die Definition von  $H_{in} = 0$  für (0,0), ein kleines positives  $H_{in}$  für (0,1)/(1,0) und ein größeres positives  $H_{in}$  für (1,1), wie in **Fig. 3** gezeigt. In diesem Fall sind keine negativen Ströme außer dem Initialisierungsschritt und keine zusätzlichen magnetischen Schichten erforderlich. Die folgenden Erklärungen verwenden zwar den ersten Ansatz, aber sie sind für alle drei von ihnen gültig. Auf die Ausgabe der magnetischen Logik kann aus dem Widerstand der zwei MTJ geschlossen werden. Eine Möglichkeit zur Verschaltung der beiden MTJ ist eine parallele oder serielle Verbindung der zwei MTJ (hohe Leitfähigkeit/niedriger Widerstand bedeutet logisch „1“, niedrige Leitfähigkeit/hoher Widerstand bedeutet logisch „0“).

Diese Ausgestaltung wird für die folgenden Erklärungen verwendet. Alternativ kann auch eine Messung des Unterschieds zwischen der Leitfähigkeit der zwei MTJ (kein Widerstandsunterschied bedeutet logisch „0“, hoher Widerstandsunterschied bedeutet logisch „1“) verwendet werden, um die logische Ausgabe zu erhalten. Der Strom für die Funktionsauswahl  $I_{fs}$  und das entsprechende magnetische Feld  $H_{fs}$  senkrecht zur Längsachse der MTJ ist dabei für die Auswahl der Logikfunktion verantwortlich.

**[0049]** Die [Fig. 2a](#) und [Fig. 2b](#) zeigen Asteroidendarstellungen, die das Schaltfeld der weichmagnetischen Schicht der beiden MTJ beschreiben, die mittels minor loop-Messungen erfasst wurden. Die Asteroidendarstellungen sind zueinander in entgegengesetzte Richtungen versetzt angeordnet, bezogen auf  $H_{in} = 0$ . Der Versatz kann durch eine magnetostatische Wechselwirkung an der Grenzschicht verursacht werden (Neélkopplung) im Falle von großen MTJ mit einer Größe von mehreren  $\mu\text{m}$  und einer signifikanten korrelierten Rauheit der beiden Oberflächen zwischen der Barriere und den zwei FM-Schichten. In dem Fall von kleineren MTJ wird die Verschiebung von der Streufeld-Kopplung zwischen den zwei FM-Schichten dominiert, die eine wachsende Verschiebung für eine abnehmende Größe der MTJ [3] hervorruft. Die Größe der Streufeld-Kopplung kann durch Einstellen des magnetischen Netto-Moments eines künstlichen Ferrimagneten (AFI) in der Referenzschicht eingestellt werden. Die Schaltfelder für das magnetische Feld  $H_{fs}$  für die Funktionswahl, welches durch die waagerechte Linie "1" in [Fig. 2a](#) markiert wird, sind mit einer gestrichelten Linie für den Fall einer vorherigen positiven Sättigung der Probe und gepunktet für den Fall einer vorherigen negativen Sättigung eingezeichnet. Im oberen Bereich der [Fig. 2a](#) wird der entsprechende Widerstand des einzelnen MTJ in Abhängigkeit von  $H_{in}$  durch ein "+" für hohen Widerstand und einem "-" für niedrigen Widerstand angegeben. Wenn beide MTJ einen niedrigen Widerstand zeigen, ist die Logikausgabe der ganzen Anordnung „niedrig“, während ein oder zwei MTJ mit einem hohen Widerstand die Ausgabe „hoch“ darstellen. Ein Vergleich der effektiven Felder  $H(i,j)$  für die logischen Signale (senkrechte durchgehende Linien in [Fig. 2a](#)) mit dem gesamten Widerstand zeigen, dass man einen hohen Widerstand und einen geringen Strom erhält entsprechend der Ausgabe 0 für (1, 1) und (0, 0) und einen geringen Widerstand/hohen Strom für (1, 0) und (0, 1). Dies entspricht der Funktion XOR.

**[0050]** Um eine nichtflüchtige Ausgabe zu erhalten, sollten die Pulse auf eine Weise zeitlich ablaufen, dass als erstes  $H_{fs}$  eingeschaltet wird, wodurch die Logikfunktion (bei „A“ in [Fig. 4b](#)) gewählt wird. Dann hat man nicht mit einer hohen Anzahl von möglichen minor loops zu tun, die das Umschalten entsprechend der Feldasteroiden angeben. Um zu verstehen, was geschieht, ist es ausreichend, sich die minor loops der beiden MTJ anzusehen, die zu dem gewählten Wert von  $H_{fs}$  gehören (siehe oberer Teil bei „A“ von [Fig. 4b](#)). Dabei sind die Ströme  $I_{in1}$  und  $I_{in2}$  durch die zwei zur Längsachse der MTJ senkrechten Leiter entsprechend der logischen Eingabe eingeschaltet (z. B. (1, 1) bei „B“ in [Fig. 4b](#)). Während dieses Schrittes schaltet die Magnetisierung der freien magnetischen Schichten der beiden MTJ in eine Konfiguration, die die logische Ausgabe festlegt. Daher kann dieser Zustand dauerhaft gespeichert bleiben. Dann wird  $H_{fs}$  wieder ausgeschaltet (bei „C“ in [Fig. 4b](#)), bevor endlich  $H_{in}$  ebenfalls ausgeschaltet wird (bei „D“ in [Fig. 4b](#)). Für hohe Werte von  $H_{fs}$  oberhalb des Punktes, an dem die Asteroiden die  $H_{fs}$ -Achse kreuzen (bei „X“ in [Fig. 4b](#)) ist es nicht sinnvoll,  $H_{in}$  auszuschalten, bevor  $H_{fs}$  ausgeschaltet oder deutlich abgesenkt ist, da ansonsten die Magnetisierung eines der MTJ wieder zurückschalten kann und die Ausgabe dann flüchtig bleibt. Für kleinere Werte von  $H_{fs}$  wie demjenigen, der in [Fig. 4b](#) benutzt wird, ist die Reihenfolge des Schaltens der Felder nicht so relevant.

**[0051]** Für den Fall „1“ von  $H_{fs}$  wie in [Fig. 2a](#) gezeigt ist die Logikfunktion unabhängig von dem anfänglichen Status der Schaltung. Für andere Werte von  $H_{fs}$  kann man andere logische Funktionen erhalten abhängig von dem anfänglichen Status der Schaltung. Der obere Teil der [Fig. 2b](#) zeigt beispielsweise die Widerstände für  $H_{fs} = „2“$ . Hier ruft eine anfängliche negative Sättigung eine AND-Funktionen vor, während man für eine anfängliche positive Sättigung eine NOR-Funktion erhält. Um diese Werte für  $H_{fs}$  zu benutzen ist ein anfänglicher Initialisierungsschritt notwendig, der die freie Schicht beider MTJ in einer Richtung gesättigt, bevor die Logikfunktion benutzt werden kann, um sicherzustellen, den Zyklus in einem definierten Status des Systems zu starten. Ohne die Verwendung einer gepinnten ferromagnetischen Schicht auf den Leitern kann dies beispielsweise durch ein gleichzeitiges Setzen der Eingabegrößen auf (0,0) und  $H_{fs}$  auf einen Wert wie bei „1“ in [Fig. 2](#) gezeigt erfolgen oder alternativ durch Benutzung eines größeren Stroms  $I_{in1}$  und  $I_{in2}$ . Bei Benutzung einer ferromagnetischen gepinnten Schicht auf den Leitern in eine Richtung ist lediglich ein Puls von  $H_{fs}$  ausreichend für die Initialisierung.

**[0052]** Bei Änderung von  $H_{fs}$  und dadurch einer Verschiebung des gesamten niedrigen Widerstandsbereiches in Abhängigkeit von  $H_{in}$  (vergleiche die schraffierte Region in [Fig. 5](#)) lassen sich verschiedene andere Logikfunktionen einstellen. Tafel 1 zeigt eine Liste aller Möglichkeiten. Auf der linken Seite von Tafel 1 ist der gesamte Widerstand symbolisiert durch oben angeordnete Kreise für hohen Widerstand und niedrig angeordnete Kreise für niedrigen Widerstand entsprechend zu [Fig. 2](#). Basierend auf der gewählten Methode zum Messen der Ausgabesignale resultieren verschiedene Logikfunktionen aus dieser Verteilung von  $R_{total}(H_{in})$  (siehe rech-

te Seite von Tafel 1). Die Verteilung von  $R_{total}$  in der letzten Zeile lässt sich nicht mit den gleichen MTJ wie bei der XOR/XNOR Funktion erreichen, weil ein großer Bereich niedrigen Widerstandes notwendig ist, um zu verhindern, dass nur (0,1)/(1,0) in einem Status geringen Widerstandes auftritt. Dies korrespondiert zu einer größeren Verschiebung der Asteroiden und daher einem unterschiedlichen Aufbau des Stapels der Schichten.

**[0053]** Für alle Erläuterungen in den letzten Abschnitten wies das beschriebene System MTJ mit einer Beeinflussung des EB pinning der Referenzschicht durch Ionenbeschuß in einem magnetischen Feld auf. Weiterhin wird nachfolgend noch an einer praktischen Umsetzung des Prinzips diese Art der Realisierung aufgezeigt. Selbstverständlich sind auch andere Umsetzungen dieser Art von magnetischer Logik grundsätzlich ebenfalls denkbar. Beispielsweise können andere magnetoresistive Effekte wie zum Beispiel giant magnetoresistance (GMR) oder auch derzeit unbekannte Effekte verwendet werden, die eine Änderung des Widerstandes des Systems hervorrufen, wenn die relative Orientierung von zwei ferromagnetischen Schichten verändert wird. In Bezug auf die hohe Effektivität von derzeit maximal 472% bei Raumtemperatur [4], die in der letzten Zeit erreicht wurden, und der Tatsache, dass die technisch ähnliche MRAM-Technik mit MTJ inzwischen kommerziell verfügbar ist [5], ist im Moment TMR der beste Kandidat für die Realisierung einer entsprechenden magnetischen Logik.

**[0054]** Im Prinzip ist es ebenfalls möglich, andere Eigenschaften der MTJ herauszufinden, die geändert werden können, wenn die relative Orientierung der Magnetisierungsrichtung geändert wird und die man zur Festlegung der logischen Ausgabe anstelle des Widerstandes benutzen kann.

Gesamtwiderstand	In	Parallel/seriell		Differenzsignal	
		Out	Logik	Out	Logik
	(0,0) (0,1)/(1,0) (1,1)	1 0 0	NOR	0 1 1	OR
	(0,0) (0,1)/(1,0) (1,1)	1 1 0	NAND	0 0 1	AND
	(0,0) (0,1)/(1,0) (1,1)	0 1 0	XOR	1 0 1	XNOR
	(0,0) (0,1)/(1,0) (1,1)	0 1 1	OR	1 0 0	NOR
	(0,0) (0,1)/(1,0) (1,1)	0 0 1	AND	1 1 0	NAND
		immer 0		immer 1	
		(immer 1)		(immer 0)	

Tabelle 1:

**[0055]** Widerstand in Abhängigkeit von  $H_{in}$  (wachsendes positives  $H_{in}$  nach rechts) für verschiedene  $H_{fs}$  (das  $H_{fs}$  wird von oben nach unten vermindert) und dementsprechend versetzter Bereich geringen Widerstands (verglichen mit [Fig. 5](#)). Hoch (niedrig) angeordnete Kreise stellen hohen (niedrigen) Gesamtwiderstand hervorgerufen durch einen unterschiedlichen (zweimal niedrig) Widerstand des einzelnen MTJ dar. Die senkrechten Linien stellen die magnetischen Felder  $H_{in}$  entsprechend der logischen Eingabe (0,0), (0,1)/(1,0) und (1,1) dar. Rechts: Die resultierende Logikfunktion ergibt sich aus der Verschiebung des niedrigen Widerstandsbereichs, der auf der linken Seite für serielle/parallele Verkabelung und auf der rechten Seite für eine Messung der Widerstandsdifferenz gezeigt wird (Beachte die unterschiedliche Breite des niedrigen Widerstandsbereichs in der letzter Zeile).

**[0056]** Ebenfalls kann man andere Techniken zur lokalen Manipulation der Richtung der EB anstelle einer Ionenbestrahlung in einem magnetischen Feld benutzen, beispielsweise die lokale Erhitzung mit einem Laser, ein Aufwachsen der Referenzelektroden der beiden MTJ eine nach der anderen in unterschiedlich orientierten magnetischen Feldern oder jeder anderen Technik, die in der Lage dazu ist, eine lokale Variation der unidirektionaler Anisotropie eines ferromagnetischen Materials herbeizuführen. Aber im Moment scheint die Ionenbestrahlung die am besten passende Möglichkeit für eine lokale Manipulation eines gesamten Wafers im Rahmen einer industriellen Produktion zu sein, da es beispielsweise schwierig ist, die Manipulation der EB mittels Laser für große Bereiche auszuführen, wie dies bei der Ionenbestrahlung für den ganzen Wafer mittels einer Lackmaske erfolgen kann. Die Anwendung eines getrennten Aufwachsens der MTJ im Magnetfeld vergrößert die Anzahl der notwendigen Schritte beim Sputtern und der Lithographie und scheint daher nicht besonders kosteneffektiv zu sein.

**[0057]** Man kann auch darüber nachdenken, die EB durch etwas anderes zu ersetzen, das in der Lage ist, zur Beibehaltung der Richtung der Magnetisierung der Referenzschicht zu dienen, mindestens bis zu der maximalen Größe des Magnetfeldes innerhalb des Anwendungsbereichs einer entsprechenden magnetischen Logikschaltungseinrichtung, wobei man mit diesem Magnetfeld eine lokale Manipulation der gegenläufigen Orientierung dieser Magnetisierung herbeiführen kann. Ein mögliches Beispiel hierfür ist die Benutzung einer zusätzlichen ferromagnetischen Schicht mit einer sehr starken uniaxialen Anisotropie und einer sehr hohen Koerzitivfeldstärke, bei der man sicher sein kann, dass die Magnetisierung durch keines der magnetischen Felder geändert werden kann, denen die magnetische Logikschaltungsanordnung ausgesetzt wird. Wenn diese magnetische Schicht an die Referenzschicht angekoppelt wird, beispielsweise mit Hilfe der antiferromagnetischen Zwischenschichtaustauschkopplung an ein MTJ durch eine nichtmagnetische Zwischenschicht wie etwa aus Ruthenium, dann ist die Richtung der Magnetisierung der Referenzschicht für alle externen magnetischen Felder festgelegt, die nicht groß genug sind zur Änderung der Richtung der Magnetisierung der zusätzlichen hartmagnetischen Schicht oder zur Überwindung der Kopplung mit der Zwischenschicht. Die relative Orientierung der Magnetisierung von zwei ferromagnetischen Schichten, bedingt durch die Zwischenschichtaustauschkopplung, kann lokal von antiparallel auf parallel durch Ionenbestrahlung geändert werden. Dies bedeutet, dass die Richtung der Referenzschicht lokal um  $180^\circ$  gedreht werden kann. Dadurch sind alle Erfordernisse für die vorgeschlagene Art der magnetischen Logik erfüllt. Im Vergleich mit der Anwendung der EB ist diese Technik weniger vorteilhaft, da größere Ionendosen notwendig werden, um die antiferromagnetische Zwischenschichtkopplung zu einer ferromagnetischen Kopplung zu ändern. Diese höhere Ionendosierung kann ein Problem sein, wenn die Referenzelektrode in einer MTJ mit einem für diesen Einsatzzweck unvorteilhaften Design nach der Aufbringung der vollständigen MTJ manipuliert werden muss. In diesem Fall kann eine höhere Ionendosierung eine größere Beeinträchtigung der sensiblen Barriere hervorrufen und die korrekte Funktion des MTJ deutlich verschlechtern. Daher kann es für diese Vorgehensweise notwendig sein, die Ionenbestrahlung vor der Aufbringung der Barrierschicht vorzunehmen. Dies ist eine interessante Option für die Manipulation der EB, aber der Effekt dieses Ansatzes auf das Wachstum der folgenden Schichten ist bisher im Detail noch nicht untersucht worden. Die Generierung von magnetischen Feldern, die sowohl für die logische Eingabe als auch für die Auswahl der Logikfunktion und die Generierung eines definierten Initialisierungsstatus verantwortlich sind, werden am einfachsten durch Ströme durch die Leiter auf dem Chip realisiert, da diese Leiter mit den vertrauten Techniken hergestellt werden können, die heute z. B. für die Produktion von Computerchips benutzt werden. Aber es ist selbstverständlich auch denkbar, dass die magnetischen Felder etwa durch magnetische Streufelder einer Spitze eines magnetischen Kraftmikroskops hergestellt werden können. Hier ist es denkbar, eine parallele Benutzung einer großen Anzahl von Spitzen vorzunehmen, wie dies bei dem IBM Millipede-Projekt zur Datenspeicherung mittels eines Arrays von atomaren Kraftmikroskopen beschrieben ist. Alternativ können auch neue Techniken im Bereich der mikroelektromechanischen Systeme (MEMS) zur Variation des effektiven magnetischen Feldes an der Position des Logikelementes benutzt werden.

**[0058]** Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zwei ferromagnetische Schichten, von denen eine mittels Pinnens festgelegt ist und eine frei externen magnetischen Feldern folgen kann, notwendig sind. Die rela-

tive Orientierung dieser ferromagnetischen Schichten muss auf eine geeignete Weise, hier z. B. durch magnetoresistive Effekte gemessen werden.

**[0059]** Das Ziel der folgenden Prinzipprüfung ist es aufzuzeigen, wie das vorstehend beschriebene Konzept dieser neuartigen magnetischen Logik tatsächlich praktisch umgesetzt werden kann. Es wird gezeigt, dass es an existierenden Beispielen benutzt werden kann, die für andere Zwecke hergestellt wurden und daher nicht in irgendeiner Weise für die Notwendigkeiten dieser Art der Logik oder überhaupt für die magnetische Logik im allgemeinen optimiert wurden. Für eine industrielle Anwendung würde man versuchen, zur Herstellung einer guten MTJ die Techniken ähnlich wie bei der Herstellung von MRAMs zu nutzen, wie beispielsweise im Hinblick auf die Wahl der Form der MTJ, eine Optimierung der Schichtanordnungen und Schichtzusammenstellungen der Schichten etc., die durch viele verschiedene Forschungsgruppen in der Vergangenheit gewonnen wurden und letztendlich in der Entwicklung eines Produktes [5] mündeten, das inzwischen kommerziell vertrieben wird.

**[0060]** Zur Prinzipprüfung wurde ein Muster benutzt, das in [6] beschrieben ist. Die Schichtung der Schichten besteht aus Cu 25 nm/Mn<sub>83</sub>Ir<sub>17</sub> 12 nm/Co<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub> 3 nm/Al 1,3 nm + Plasma Oxidation/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 4 nm/Ta 3 nm/Cu 47 nm/Au 26 nm. Diese wurden bei 275°C für eine Stunde in einem magnetischen Feld mit H<sub>FC</sub> = 1000 Oe getempert. Ein Teil der Probe wurde mit Heliumionen (10 keV, 3 × 10<sup>15</sup> Ionen/cm<sup>2</sup>) beschossen in einem magnetischen Feld H<sub>IB</sub> rechtwinklig zu H<sub>FC</sub> und danach erneut für eine Stunde bei 275°C ohne externes magnetisches Feld getempert. Zur Einstellung einer antiparallelen Orientierung der Magnetisierungsrichtung der Referenzschicht wurde ein nicht mit Ionen beschossener Teile der Probe entfernt und um 90° gedreht. Auf beiden Teilen wurden neue MTJ einstrukturiert. Dann wurden die unten liegenden Verbindungsleiter angebondet und eine nicht mit Ionen beschossene und eine mit Ionen beschossene rechteckige MTJ der Größe 100 µm × 100 µm mittels Golddrähten kontaktiert (siehe hierzu [Fig. 6](#)).

**[0061]** [Fig. 7](#) zeigt minor loops (10 mV biss Spannung) gemessen an einer lediglich feldgekühlten MTJ (TMR = 48,5%, R<sup>a</sup><sub>min</sub> = 3,6 M'Ωµm<sup>2</sup>), einer feldgekühlten und zusätzlich Ionen bestrahlten MTJ (TMR = 35,6%, R<sup>a</sup><sub>min</sub> = 6,8 M'Ωµm<sup>2</sup>) und einer seriell verdrahteten Anordnung dieser beiden MTJ (R<sup>a</sup><sub>min</sub> = 10,5 M'Ωµm<sup>2</sup>). Man kann feststellen, dass die Umschaltung der nicht ionenbestrahlten MTJ (bei positiven Werten von H<sub>in</sub>) in einem um 27% geringeren Wechsel des Widerstandes der MTJ-Anordnung als die Umschaltung der ionenbestrahlten MTJ resultiert, obwohl deren TMR-Wert um 36% höher ist. Dies ist ein Ergebnis des größeren Widerstandes und der daher absolut höheren Änderung der Widerstandes der mit Ionen bestrahlten MTJ. Durch Messung von minor loops von zwei verbundenen MTJ für verschiedene Werte von H<sub>fs</sub> (siehe [Fig. 8](#)) können die Schaltfeldasteroiden der beiden MTJ gemäß [Fig. 9](#) ermittelt werden. Es ist offensichtlich, dass die Koerzitivfeldstärke der freien Schicht kleiner ist als die Verschiebung der Asteroiden. Daher ist es nicht möglich, diese als NOR und AND-Funktionen mit diesen zwei MTJ bei serieller Verschaltung zu nutzen. Darüber hinaus ist die Logikausgabe flüchtig, da diese MTJ nur einen Widerstandstatus mit Remanenz haben. Desweiteren wurden H<sub>in</sub> und H<sub>fs</sub> durch Helmholtz-Spulen simuliert ((0,0): -13 Oe, (0,1)/(1,0): 0 Oe und (1,1): 17 Oe), während der Widerstand der seriellen Anordnung der MTJ gemessen wurde. [Fig. 10](#) zeigt die Messwerte für H<sub>fs</sub> = 3 Oe bei Initialisierung mit positivem H<sub>in</sub>. Erst nach 5 Sekunden wurde H<sub>fs</sub> auf 3 Oe gesetzt. Dann wurde die Probe bei 60 Oe für 15 Sekunden gesättigt, bevor H<sub>in</sub> für 25 bis 30 Sekunden auf einen Wert gesetzt wurde entsprechend des logischen Eingangs. Anschließend ist die logische Ausgabe sichtbar. Nach 45 Sekunden wurde H<sub>fs</sub> ausgeschaltet und abschließend nach 55 Sekunden H<sub>in</sub> ebenfalls ausgeschaltet. Diese Art der Messung wurde für alle drei Werte von H<sub>in</sub> entsprechend den logischen Eingaben (0,0), (0,1)/(1,0) und (1,1) durchgeführt. Die Zeitabhängigkeit der magnetischen Felder für die Eingabe (1,1) ist in dem oberen Teil aller Unterfiguren der [Fig. 10](#) aufskizziert. Die Zeit zwischen den Schaltschritten und die längere und variierende Dauer des Wechsels der magnetischen Felder und die entsprechende Änderung des Widerstandes sind keine typische Eigenschaft dieser Art magnetischer Logik, sondern resultieren aus den angewendeten manuellen Schalteinrichtungen für die Ströme durch die Helmholtz-Spulen. Das Ergebnis der Messungen zeigt in [Fig. 10a](#) einen hohen Widerstand (Ausgabe „0“) für (1,1) und geringen Widerstand (Ausgabe „1“) für (0,0)/0,1) und (1,0). Dies stellt eine NAND-Funktion dar. In der gleichen Weise wurden die Funktionen OR und XOR gemessen für H<sub>fs</sub> = 3 Oe nach der Initialisierung mit einem negativen magnetischen Feld ([Fig. 10b](#)) und H<sub>fs</sub> = 13 Oe nach einer Initialisierung mit einem positiven magnetischen Feld ([Fig. 10c](#)). Ein Widerstand oberhalb der Markierung zeigt eine logische Ausgabe von „0“ an, während ein Widerstand unterhalb der Markierung identisch ist mit einer logischen Ausgabe „1“. Die unterschiedlichen Widerstände der Messungen mit der logischen Eingabe (1,1) in [Fig. 10b](#) verglichen mit den anderen Messungen der [Fig. 10](#) resultieren aus einer nicht perfekten Kontaktierung zwischen den Goldspitzen und den MTJ, durch die die Messung sensibel auf die mechanischen Einflüsse der Umgebung reagierte. Die Tatsache, dass der Ausgangswiderstand (für über 35 bis 45 Sekunden bei diesen Messungen) für die logische Eingabe (0,0) und (1,1) in [Fig. 10c](#) deutlich unterschiedlich ausgefallen ist, kann dadurch erklärt werden, dass die TMR-Werte/Widerstände der zwei benutzten MTJ unterschiedlich waren (vergleiche [Figur 7](#) und [8](#)). Dies zeigt deutlich die Wichtigkeit einer absolut gleichen Änderung der Widerstände beider MTJ

für den Fall einer seriellen Verdrahtung. Zusätzlich passen die Werte von  $H_{in}$  für die logische Eingabe nicht perfekt zu den gewählten Werken von  $H_{fs}$  für diese beiden MTJ. Trotzdem kann die Funktion XOR eindeutig identifiziert werden.

**[0062]** Zur Bereitstellung aller logischen Funktionen und einer nicht flüchtigen Ausgabe sollten kleine elliptische MTJ mit einer Streufeldkopplung verwendet werden, die durch die Wahl eines Netto-Momentes eines AFI angepasst werden. Hierdurch werden zwei sich überlappende Asteroiden mit zwei Widerstandszuständen bei Remanenz, wie in **Fig. 2** gezeigt, erreicht. Unterschiede in der TMR Amplitude oder dem Widerstand zwischen Ionen bestrahlten und nicht Ionen bestrahlten MTJ können für eine serielle Verdrahtung durch eine Einjustierung der Elementgröße kompensiert werden, um eine gleiche Änderung des Widerstandes unabhängig von der jeweils schaltenden MTJ zu erreichen (vergleiche **Fig. 10c**). Ein Nachteil für die Widerstandsmessung von seriell verschalteten MTJ ist die verminderte relative Änderung der Magnetoresistenz von beiden MTJ verglichen mit jedem einzelnen MTJ (siehe **Fig. 7**).

**[0063]** Im Gegensatz hierzu können die vollen TMR-Werte für die Messung der Widerstandsdifferenz erreicht werden. Aber für diesen Fall ist die Kompensation der verschiedenen Widerstandswerte von Ionen bestrahlten und nicht Ionen bestrahlten MTJ durch Variation der Elementgröße nicht möglich. Deswegen muss die Gleichheit aller MTJ hierbei garantiert werden durch eine gute Wahl der Ionendosierung und der Energie während der Ionenbestrahlung, vorzugsweise die Benutzung einer Stapelanordnung mit dem gepinnten ferromagnetischen Schichten oberhalb der Trennschicht zur Minimierung von Defekten in der Trennschicht während des Ionenbeschusses und einem nachträglichen Tempern zur Entfernung möglicher Defekte.

#### Bibliographie

- [1] W. J. Gallagher und S. S. P. Parkin, Development of the magnetic tunnel junction, MRAM at IBM: From first junctions to a 16-Mb MRAM demonstrator chip, IBM Journal of Research and Development 50, 5 (2006)
- [2] R. Richter, L. Bär, J. Wecker und G. Reiss, Nonvolatile field programmable spin-logic for reconfigurable computing, Applied Physics Letters 80, 1291 (2002).
- [3] D. Meyners, K. Rott, H. Brückl, G. Reiss und J. Wecker, Submicron-sized magnetic tunnel junctions in field programmable logic gate arrays, Journal of Applied Physics 99, 023907 (2006).
- [4] J. Hayakawa, S. Ikeda, Y. M. Lee, F. Matsukura und H. Ohno, Effect of high annealing temperature on giant tunnel magnetoresistance ratio of Co-FeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, Applied Physics Letters 89, 232510 (2006).
- [5] Freescale Semiconductor, Data Sheet 256K×16-Bit 3.3-V Asynchronous Magnetoresistive RAM, MR2A16A, 2006, Document Number: MR2A16A, Rev. 3, 6/2006, published at <http://www.freescale.com>.
- [6] V. Höink, M. D. Sacher, J. Schmalhorst, G. Reiss, D. Engel, D. Junk und A. Ehresmann, Postannealing of magnetic tunnel junctions with ionbombardment-modified exchange bias, Applied Physics Letters 86, 152102 (2005).

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 10053206 C1 [0013]
- DE 10113787 C1 [0013, 0013]
- DE 10255857 B3 [0014]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- J. Hayakawaa in Appl. Phys. Lett. 89, 232510 (2006) [0020]
- S. S. P. Parkin in nature materials, Vol. 3, 826 (2004) [0020]
- W. J. Gallagher et al. in IBM J. RES. & DEV. VOL. 50, 5 (2006) [0021]
- W. J. Gallagher und S. S. P. Parkin, Development of the magnetic tunnel junction, MRAM at IBM: From first junctions to a 16-Mb MRAM demonstrator chip, IBM Journal of Research and Development 50, 5 (2006) [0063]
- R. Richter, L. Bär, J. Wecker und G. Reiss, Nonvolatile field programmable spin-logic for reconfigurable computing, Applied Physics Letters 80, 1291 (2002) [0063]
- D. Meyners, K. Rott, H. Brückl, G. Reiss und J. Wecker, Submicron-sized magnetic tunnel junctions in field programmable logic gate arrays, Journal of Applied Physics 99, 023907 (2006) [0063]
- J. Hayakawa, S. Ikeda, Y. M. Lee, F. Matsukura und H. Ohno, Effect of high annealing temperature on giant tunnel magnetoresistance ratio of Co-FeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, Applied Physics Letters 89, 232510 (2006) [0063]
- Freescale Semiconductor, Data Sheet 256K×16-Bit 3.3-V Asynchronous Magnetoresistive RAM, MR2A16A, 2006, Document Number: MR2A16A, Rev. 3, 6/2006, published at <http://www.freescale.com> [0063]
- V. Höink, M. D. Sacher, J. Schmalhorst, G. Reiss, D. Engel, D. Junk und A. Ehresmann, Postannealing of magnetic tunnel junctions with ionbombardment-modified exchange bias, Applied Physics Letters 86, 152102 (2005) [0063]

## Patentansprüche

1. Rekonfigurierbare magnetische Logikschaltungsanordnung, aufweisend mindestens zwei magnetoresistive Elemente bestehend aus mindestens je zwei magnetischen Schichten, die jeweils durch eine Zwischenschicht voneinander getrennt sind, wobei eine der magnetischen Schichten als Referenzschicht ihre Magnetisierung unter Einfluss externer Magnetfelder nicht wesentlich und die andere magnetische Schicht als freie Schicht ihre Magnetisierung unter Einfluss externer Magnetfelder erfassbar ändert, sowie mindestens einem Leiter für mindestens zwei Signalanschlüsse, mit dem im stromdurchflossenen Zustand ein auf die magnetoresistiven Elemente einwirkendes und die Magnetisierung der freien Schichten umschaltendes erstes Magnetfeld erzeugbar ist, sowie eine Einrichtung zur bedarfsabhängigen Erzeugung eines zweiten veränderbaren Magnetfeldes, das ebenfalls die magnetoresistiven Elemente beeinflusst, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei derartige magnetoresistive Elemente benachbart zueinander angeordnet sind, wobei die Magnetisierung der beiden Referenzschichten durch eine vorab eingestellte unidirektionale Anisotropie gegenläufig ausgerichtet ist und die magnetoresistiven Elemente derart miteinander verschaltet sind, dass durch Einwirkung der ersten und zweiten Magnetfelder auf die magnetoresistiven Elemente aufgrund der sich ergebenden Änderungen der Ausrichtung der Magnetisierung der freien Schichten und damit des Widerstandes der magnetoresistiven Elemente an der Logikschaltungsanordnung das Schaltverhalten aller grundlegenden logischen Funktionen, insbesondere der Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR oder XNOR, hervorrufbar ist.
2. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur bedarfsabhängigen Erzeugung des zweiten veränderbaren Magnetfeldes einen bestrombaren Leiter umfasst, dessen Lage senkrecht zu dem Leiter für die mindestens zwei Signalanschlüsse ausgerichtet ist.
3. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich der Logikschaltungsanordnung ein magnetisch wirksames Element angeordnet ist, vorzugsweise der oder die Leiter für die mindestens zwei Signalanschlüsse des ersten veränderbaren Magnetfeldes ein solches magnetisch wirksames Element umfassen, dessen Magnetfeld parallel oder antiparallel zu der Magnetisierung der Referenzschicht der magnetoresistiven Elemente ausgerichtet ist.
4. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und das zweite magnetische Feld sich bezüglich der Schaltung der magnetoresistiven Elemente derart überlagert, dass sich wahlweise das Schaltverhalten aller grundlegenden logischen Funktionen, insbesondere der Funktionen AND, OR, NAND, NOR, XOR oder XNOR, an der Schaltung der magnetoresistiven Elemente einstellen lässt.
5. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltasteroiden der beiden gegenläufig gepinnten magnetoresistiven Elemente aufgrund der Exchange-Biss-Kopplung (EB) der Referenzschichten zueinander versetzt angeordnet sind.
6. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetischen Schichten der magnetoresistiven Elemente aus ferromagnetischen Materialien gebildet sind.
7. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzschichten der magnetoresistiven Elemente jeweils ein hartmagnetisches Material aufweisen.
8. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die freien Schichten der magnetoresistiven Elemente jeweils ein weichmagnetisches Material aufweisen.
9. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das ferromagnetische Material CoFe, NiFe, CoFeB oder Heusler-Verbindungen aufweist.
10. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die unidirektionale Anisotropie der Referenzschicht der magnetoresistiven Elemente aufgrund einer Austauschkopplung zwischen einem ferromagnetischen und einem antiferromagnetischen Material besteht.
11. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenschicht eine Isolatorschicht ist.
12. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolatorschicht Magnesiumoxid MgO oder Aluminiumoxid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als Isolatormaterial aufweist.

13. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetoresistiven Elemente Tunnel-magnetische Widerstandselemente (TMR-Elemente) sind.
14. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenschicht eine unmagnetische Metallschicht ist.
15. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetoresistiven Elemente Riesenmagnetowiderstandselemente (GMR-Elemente) sind.
16. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das im wesentlichen unveränderliche magnetische Verhalten der Referenzschichten der magnetoresistiven Elemente durch zusätzliche magnetische Schichten mit einer starken unidirektionalen Anisotropie und/oder einer hohen Koerzitivfeldstärke stabilisierbar ist, die über eine nichtmagnetische Schicht durch eine Zwischenschichtaustauschkopplung an den Referenzschichten ankoppelbar ist.
17. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die unidirektionale Anisotropie der Referenzschichten der beiden magnetoresistiven Elemente aufgrund der Exchange Bias Kopplung (EB) gegenläufig ausgerichtet ist.
18. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetoresistiven Elemente eine rechteckige Grundform aufweisen.
19. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetoresistiven Elemente eine elliptische Grundform mit einer langen Hauptachse und einer kurzen Hauptachse aufweisen.
20. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Feldstärke am Ort der miteinander verschalteten magnetoresistiven Elemente im wesentlichen gleich ist.
21. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Eingabesignale an die Schaltung der magnetoresistiven Elemente durch mindestens einen Leiter aufprägar sind, auf dem einzeln oder gleichzeitig unterschiedliche Stromstärken für die unterschiedlichen Signalpegel einer logischen 0 oder einer logischen 1 auf die Schaltung der magnetoresistiven Elemente aufgegeben werden.
22. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass die durch die Eingabesignale auf dem Leiter verursachten Magnetfelder sich derart überlagern, dass eine gezielte Änderung der Magnetisierung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente eine Änderung des Gesamtverhaltens der Schaltung der magnetoresistiven Elemente hervorruft.
23. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter zur Aufprägung der Eingabesignale derart zu der Magnetisierungsrichtung der Referenzschichten der magnetoresistiven Elemente angeordnet sind, dass das erzeugte magnetische Feld parallel zu der Magnetisierungsrichtung der Referenzschichten ausgerichtet ist.
24. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass je Eingabesignal für die Schaltung der magnetoresistiven Elemente ein eigener Leiter vorgesehen ist.
25. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die durch den mindestens einen Leiter hervorgerufene Magnetwirkung der magnetoresistiven Elemente derart ausgebildet ist, dass sich ein negatives Feld bei einem negativen Strom beider Signale, ein Nullfeld mit einem positiven und einem negativen Strom bei jeweils einem der beiden Signale und ein positives Feld bei einem positiven Strom gleichzeitig für beide Signale einstellt.
26. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf den mindestens einen Leiter zur Aufprägung der Eingabesignale gepinnte hardmagnetische Bahnen derart aufgebracht sind, dass sich ein Streufeld gleicher Amplitude, aber gegenläufiger Ausrichtung zu dem magnetischen Feld ergibt, das sich aufgrund eines Stromflusses durch den Leiter ergeben würde.

27. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass das Streufeld durch die Dicke der gepinnten hardmagnetischen Bahnen und die Richtung des Pinnens festlegbar ist.

28. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 26 oder 27, dadurch gekennzeichnet, dass sich das durch den Strom durch den Leiter mit den zwei Anschlüssen hervorgerufene erste Magnetfeld und das dazu parallele oder antiparallele zusätzliche Magnetfeld derart überlagern, dass sich ein negatives Feld bei einem Nullstrom beider Signale, ein Nullfeld bei einem Strom nur für eines der beiden Signale und ein positives Feld bei einem Strom gleichzeitig für beide Signale einstellt.

29. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 26 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass für die Aufprägung der Signale keine bipolaren Ströme notwendig sind.

30. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass unterschiedliche positive Magnetfeldstärken für die Darstellung der einzelnen Schaltantworten der Schaltung der magneto-resistiven Elemente verwendbar sind.

31. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das weitere magnetische Feld zur Einstellung des Schaltverhaltens senkrecht zur langen Halbachse der elliptischen magneto-resistiven Elemente und der Magnetrichtung der Referenzschichten ausgerichtet ist.

32. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltung der magneto-resistiven Elemente vor jedem Schaltvorgang in einen definierten Ausgangszustand schaltbar ist.

33. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass der definierte Ausgangszustand eine positive oder eine negative Sättigung der freien Schichten der magneto-resistiven Elemente aufweist.

34. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die magneto-resistiven Elemente seriell miteinander verschaltet sind.

35. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass die magneto-resistiven Elemente parallel miteinander verschaltet sind.

36. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Vorliegen einer hohen Leitfähigkeit und damit eines geringen Widerstandes der magneto-resistiven Elemente ein Verhalten der magneto-resistiven Elemente vorliegt, das als logische 1 und bei Vorliegen einer geringen Leitfähigkeit und damit eines hohen Widerstandes als logische 0 verstanden wird.

37. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Differenz zwischen der Leitfähigkeit oder dem Widerstand der beiden magneto-resistiven Elemente eine Schaltantwort der Schaltung der beiden magneto-resistiven Elemente angibt.

38. Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, dass keine Differenz hinsichtlich Leitfähigkeit oder Widerstand zwischen den beiden magneto-resistiven Elementen als logische 0 und eine hohe Widerstandsdifferenz als logische 1 verstanden wird.

39. Logikschaltungsanordnung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Vielzahl von vorzugsweise gleichartigen rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnungen auf einer gemeinsamen Logikschaltung angeordnet sind.

40. Verfahren zur Herstellung einer rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass vor, während oder nach der Herstellung der magneto-resistiven Elemente eine gezielte Ausrichtung der Magnetisierung der Referenzschichten zumindest abschnittsweise in den Bereichen hergestellt wird, in denen magneto-resistive Elemente angeordnet sind, und vor, während oder nach der vollständigen oder teilweisen Herstellung der magneto-resistiven Elemente bei festlegbaren magneto-resistiven Elementen oder in den Bereichen, in denen magneto-resistive Elemente angeordnet werden, die Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht geändert wird.

41. Verfahren gemäß Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass die selektive Änderung der Ausrichtung

der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht durch Ionenbeschuß in einem Magnetfeld erfolgt.

42. Verfahren gemäß Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass die selektive Änderung der Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht durch lokale Erwärmung der Referenzschicht, vorzugsweise durch einen Laser, in einem Magnetfeld erfolgt.

43. Verfahren gemäß Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass die selektive Änderung der Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht durch getrenntes Sputtern von Teilen der magnetoresistiven Elemente in entgegengesetzten äußeren Magnetfeldern erfolgt.

44. Verfahren gemäß Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass die selektive Änderung der Ausrichtung der Magnetisierung der jeweiligen Referenzschicht durch Abdecken der nicht zu verändernden Abschnitte mit den nicht zu verändernden magnetoresistiven Elemente, vorzugsweise durch Abdeckmasken oder dgl. erfolgt.

45. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Herstellung der magnetoresistiven Elemente mit gegenläufiger Ausrichtung der Magnetisierungsrichtung der beiden Referenzschichten mittels üblicher lithographischer Verfahren oder Ätzverfahren erfolgt.

46. Verfahren zum Betrieb einer rekonfigurierbaren magnetischen Logikschaltungsanordnung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass beim Betrieb der Schaltung der beiden magnetoresistiven Elemente vor jedem Schaltvorgang als erstes die freien Schichten der magnetoresistiven Elemente negativ oder positiv gesättigt werden, danach das magnetische Feld zur Auswahl der Logikfunktion eingestellt und/oder die Logiksignale auf den mindestens einen Leiter aufgegeben und damit die Magnetisierung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente verändert und die logische Antwort der Schaltung ermittelt wird.

47. Verfahren gemäß Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, dass die Sättigung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente abhängig von der einzustellenden Logikfunktion der Schaltung der magnetoresistiven Elemente gewählt wird.

48. Verfahren gemäß Anspruch 47, dadurch gekennzeichnet, dass der mindestens eine Leiter zur Zuführung der Eingangssignale auch zur Zuführung der Sättigung der freien Schichten der magnetoresistiven Elemente genutzt wird.

49. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 46 bis 48, dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Abschalten der Logiksignale das magnetische Feld zur Auswahl der Logikfunktion abgeschaltet wird.

50. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 46 bis 49, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung des magnetischen Feldes für die Auswahl der Logikfunktion sowie für die Logiksignale getaktete Ströme benutzt werden.

51. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 46 bis 50, dadurch gekennzeichnet, dass die gleichartigen Logikschaltungsanordnungen auf der gemeinsamen Logikschaltung je nach Einstellung gleichzeitig unterschiedliche logische Funktionen ausführen.

52. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 46 bis 50, dadurch gekennzeichnet, dass die gleichartigen Logikschaltungsanordnungen auf der gemeinsamen Logikschaltung je nach Einstellung gleichzeitig gleiche logische Funktionen ausführen.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

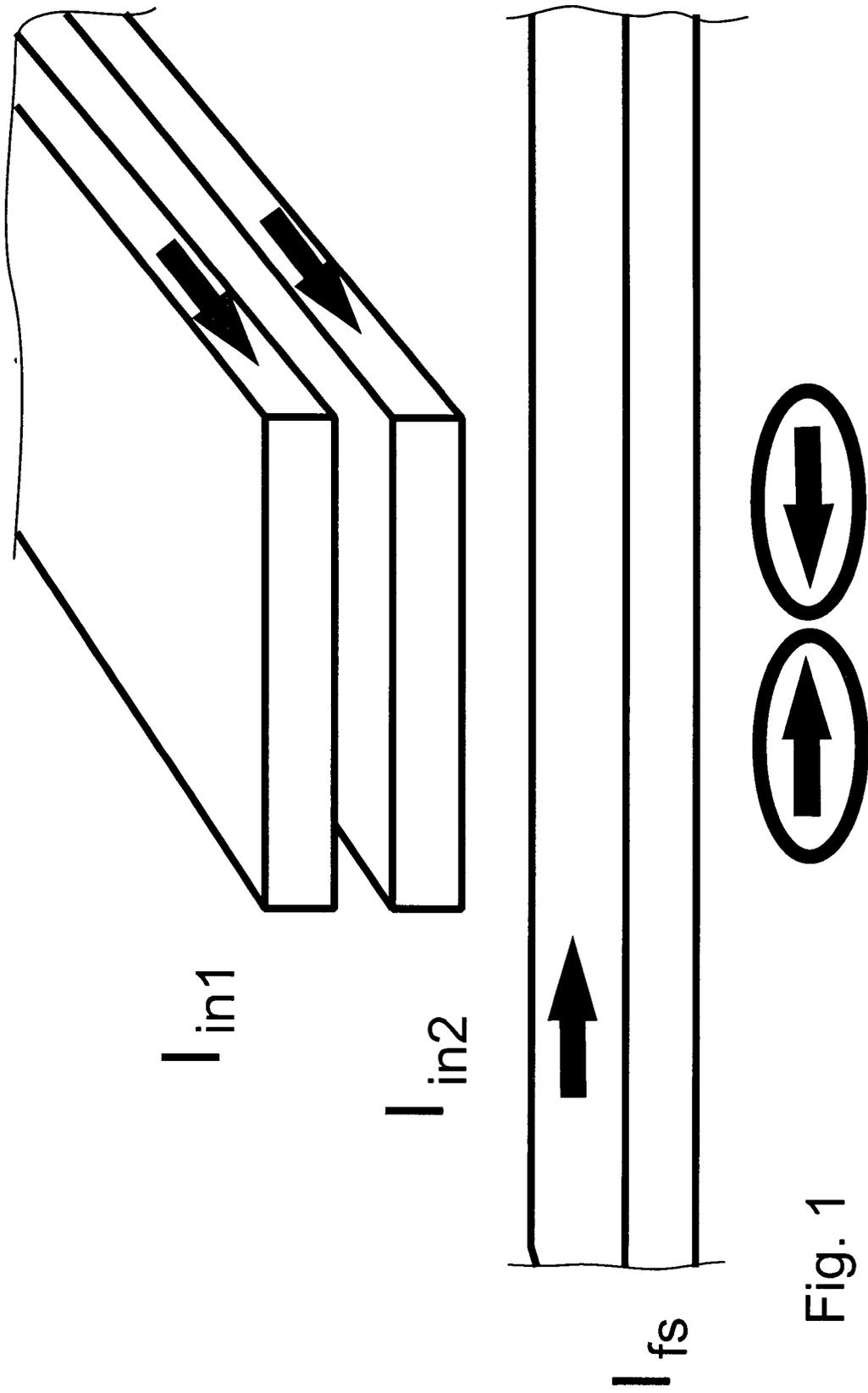
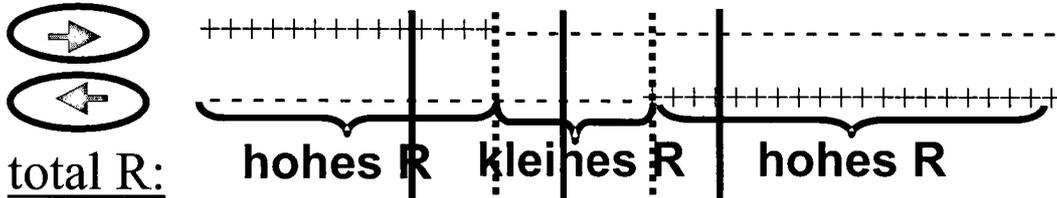


Fig. 1

Nach negativer Sättigung:



Nach positiver Sättigung:

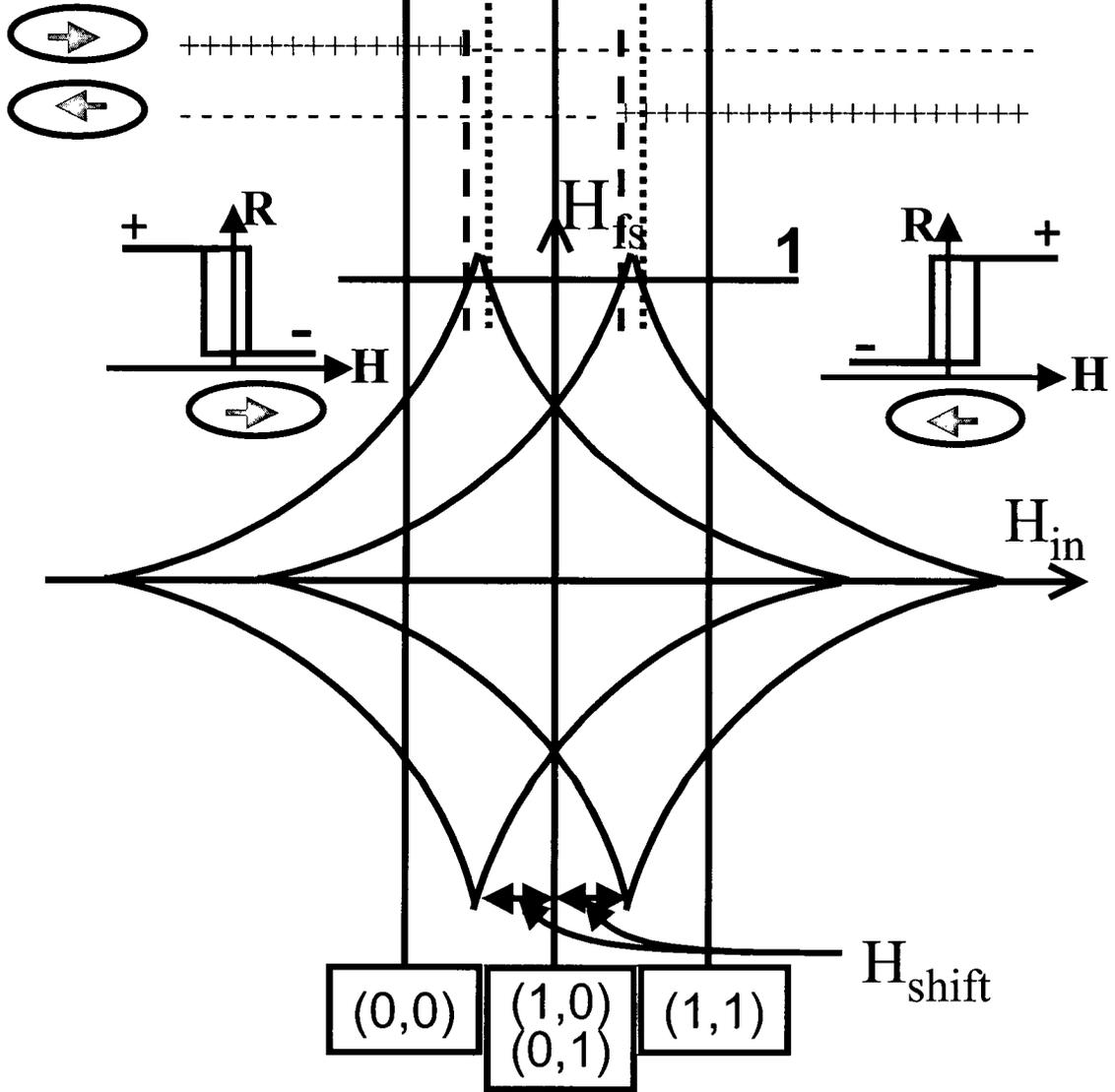
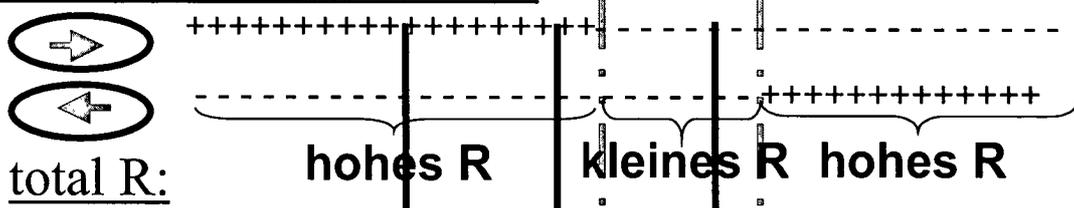


Fig. 2a

Nach negativer Sättigung:



Nach positiver Sättigung:

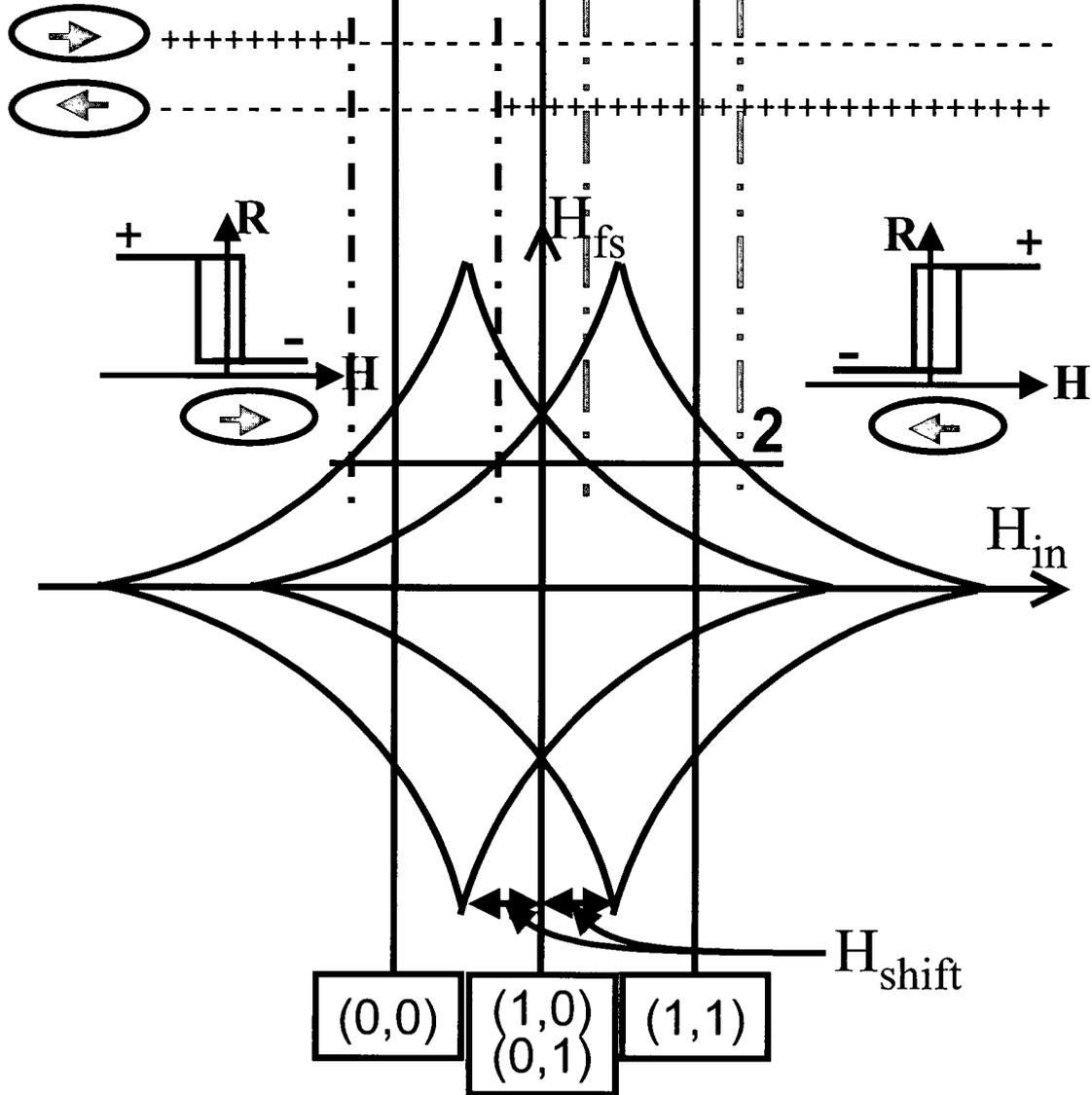


Fig. 2b

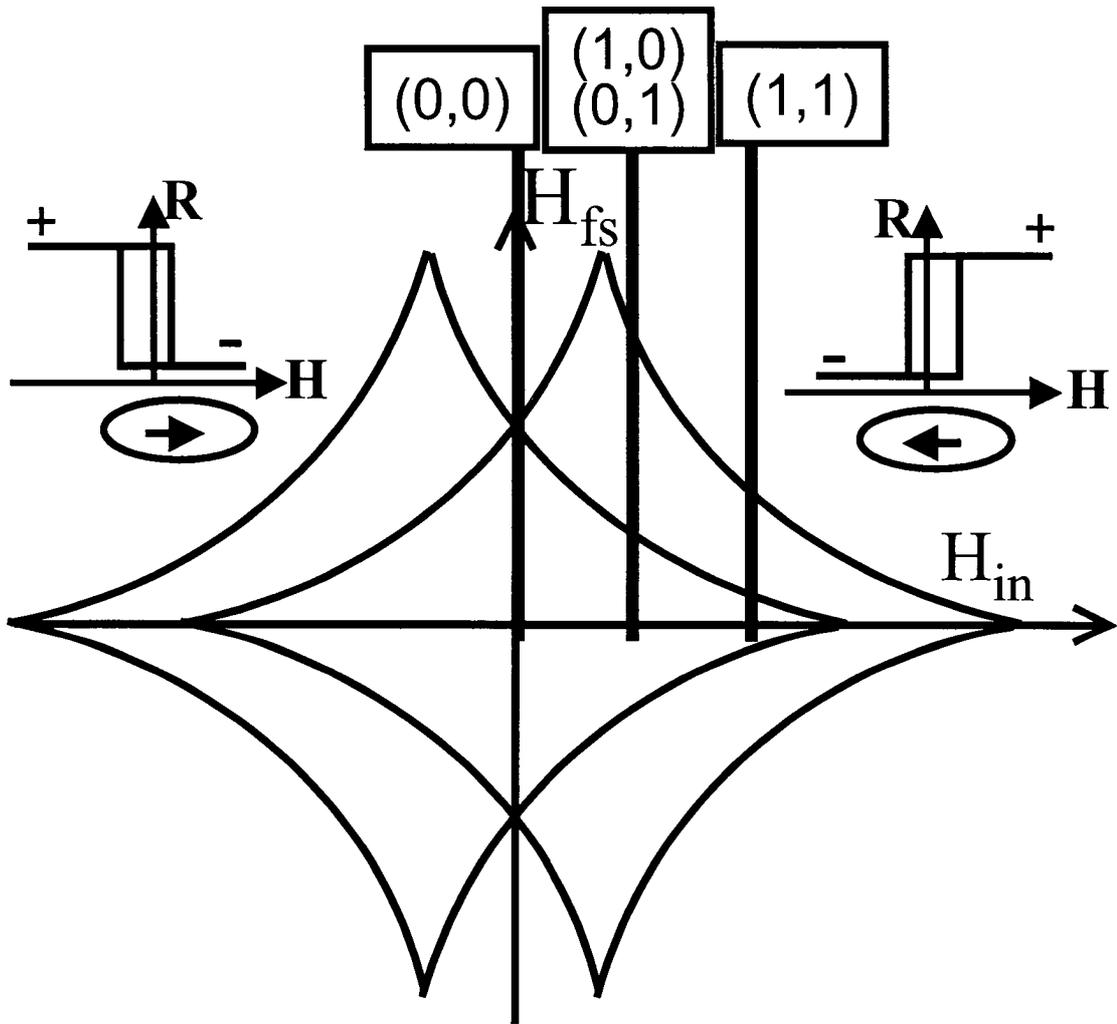
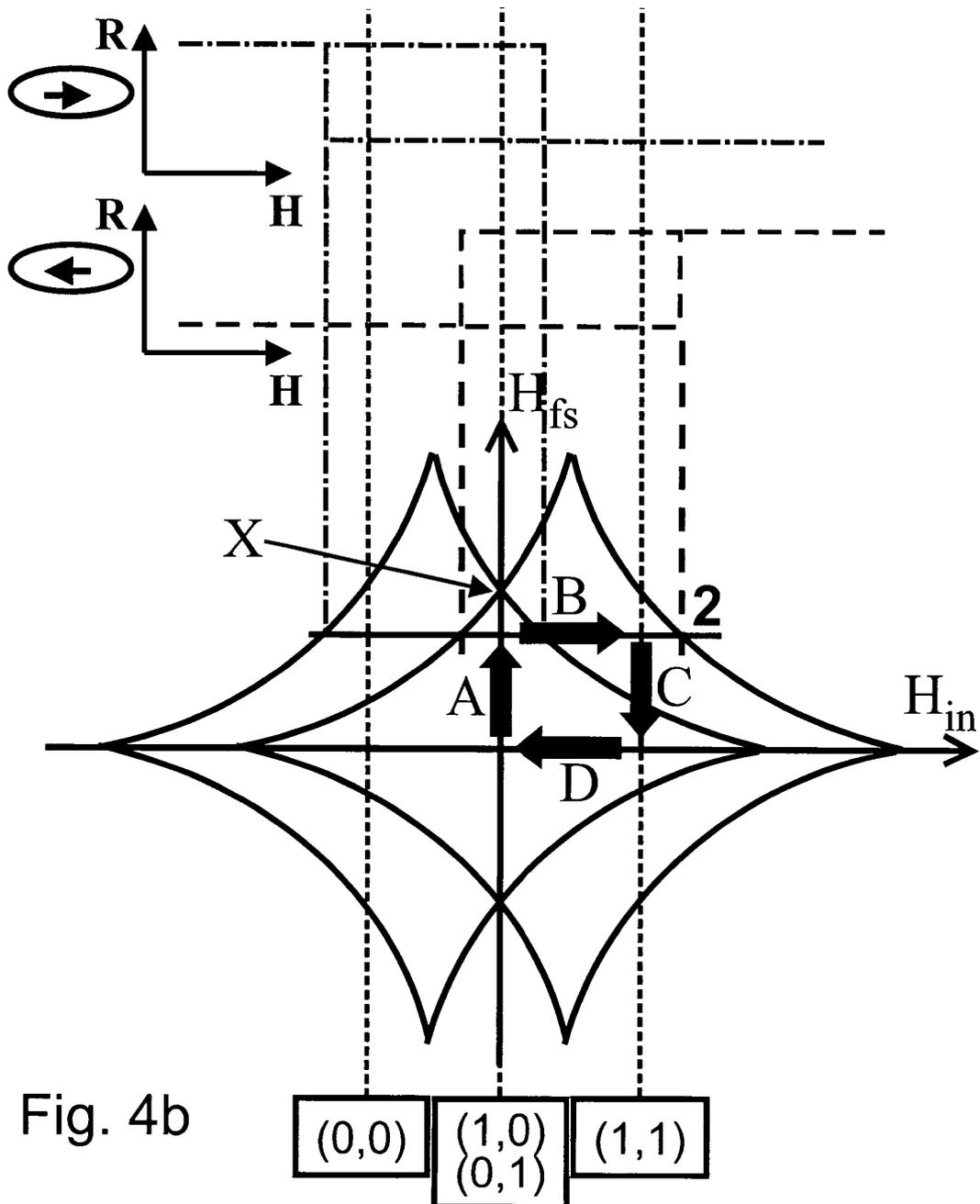
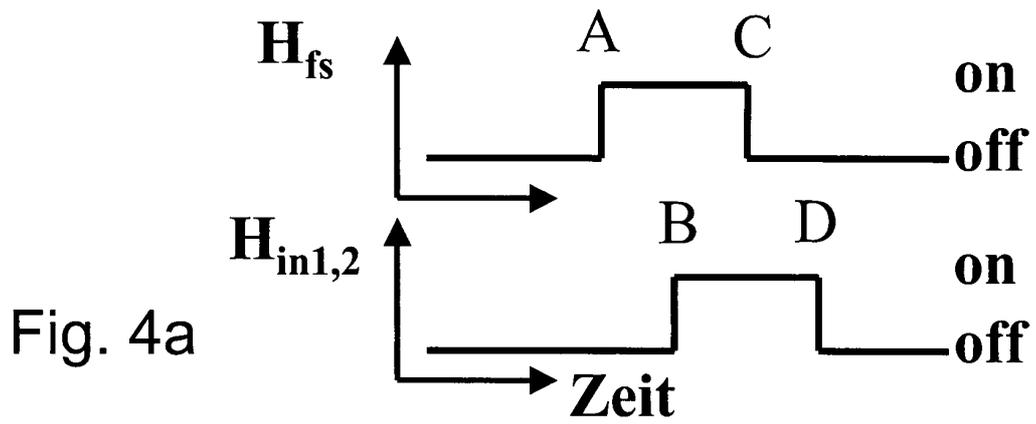


Fig. 3



Nach negativer Sättigung:

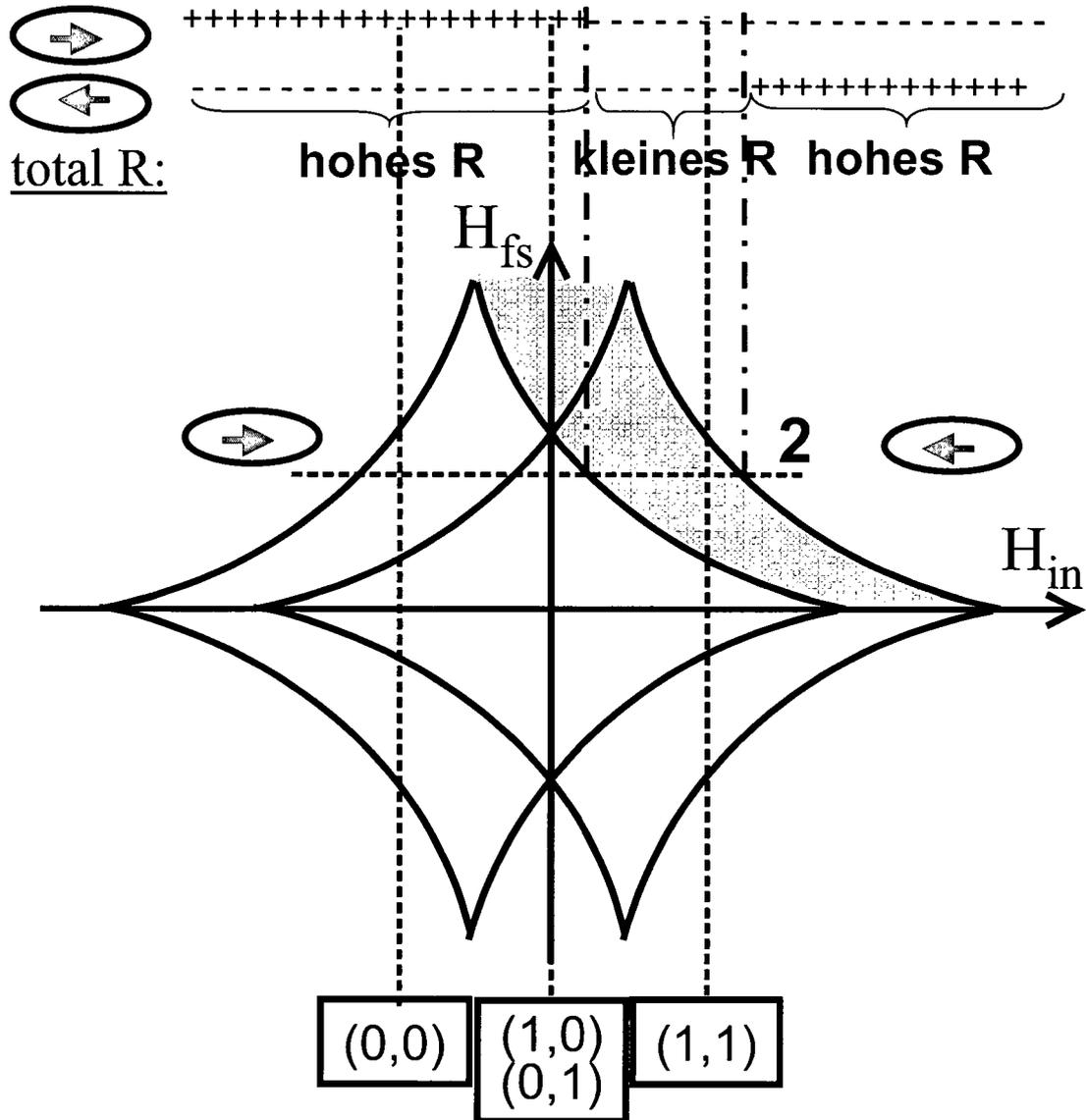


Fig. 5

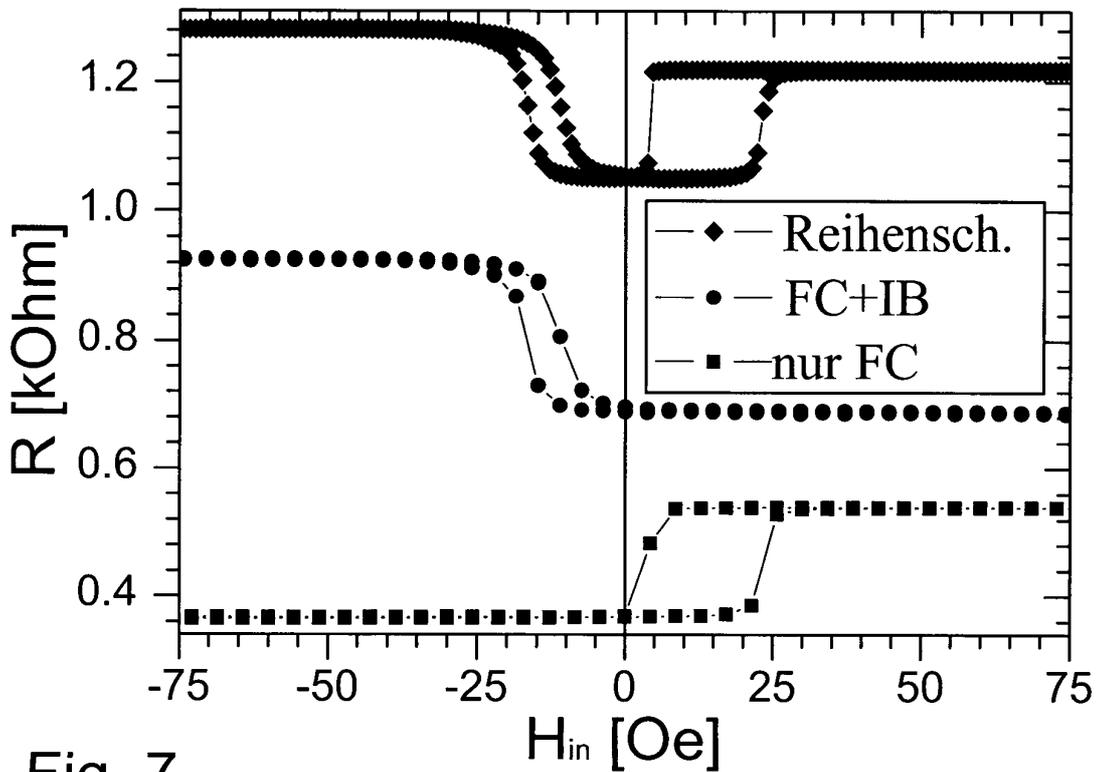
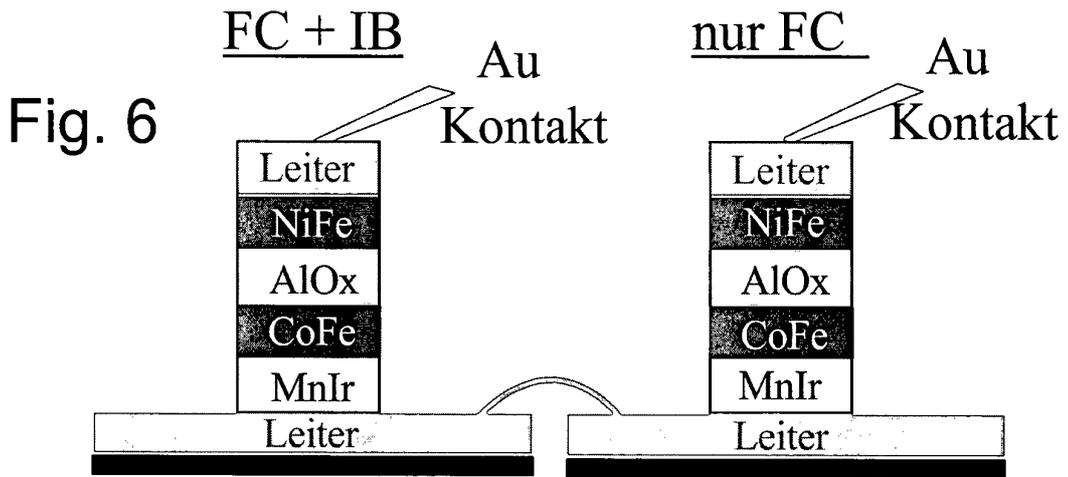
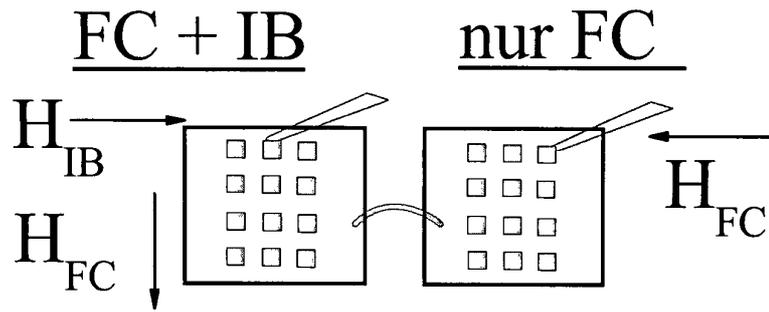


Fig. 7

Fig. 8

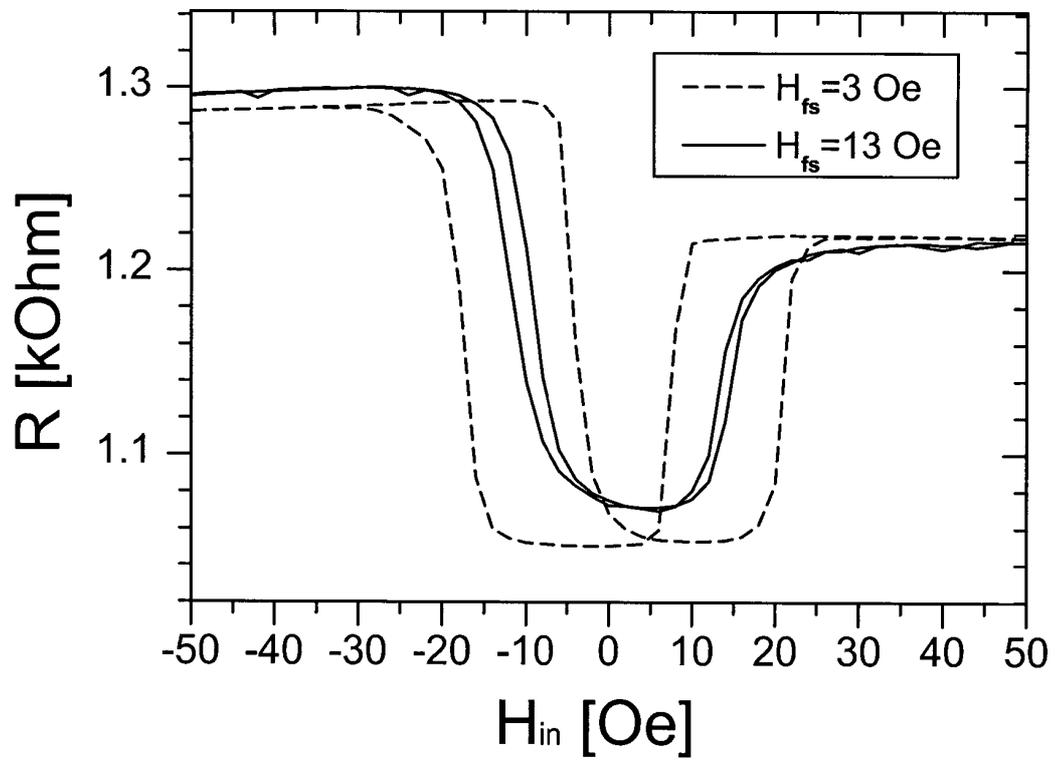
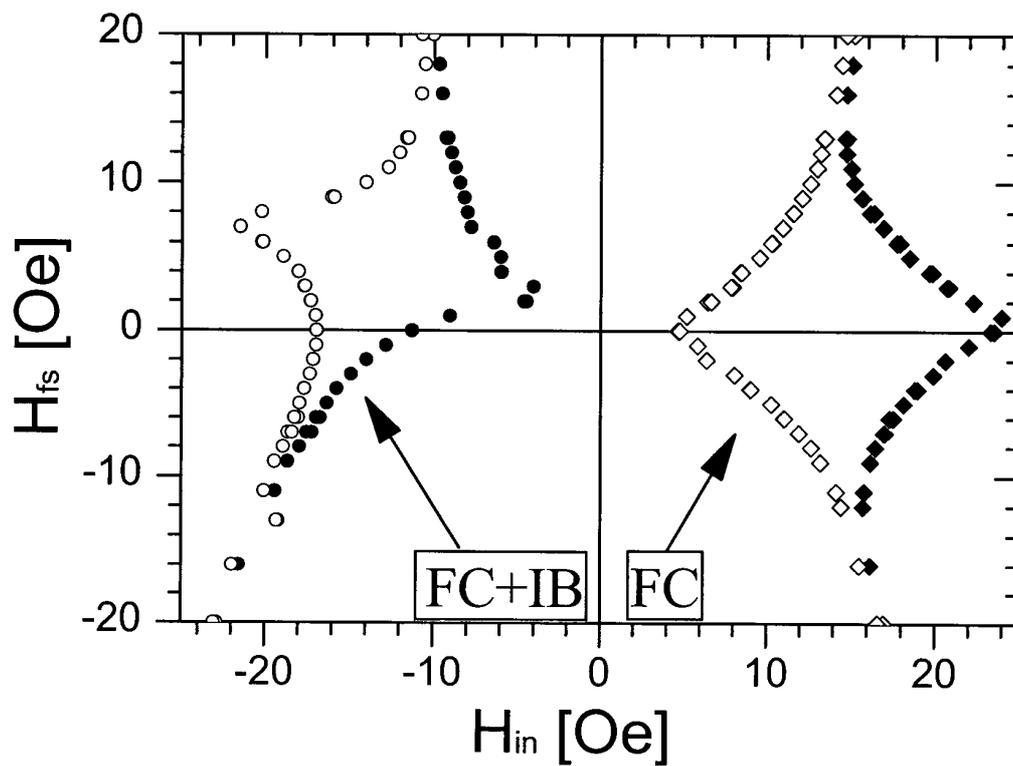


Fig. 9



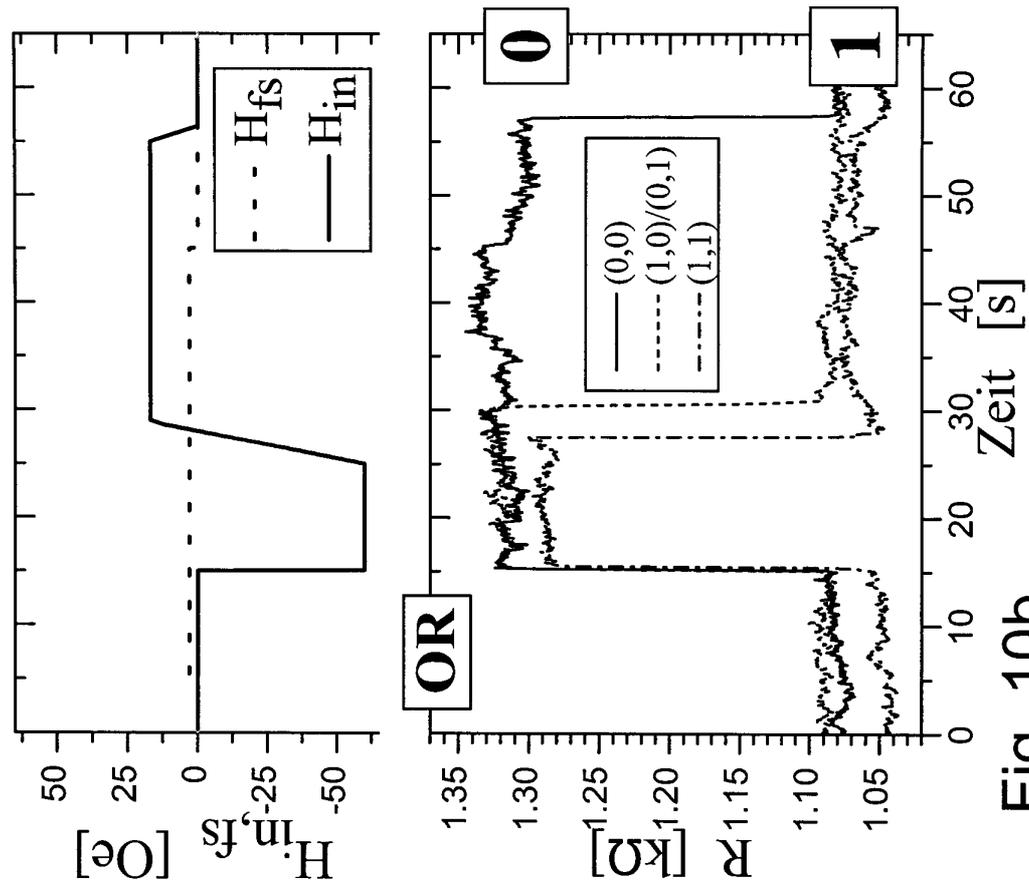


Fig. 10b

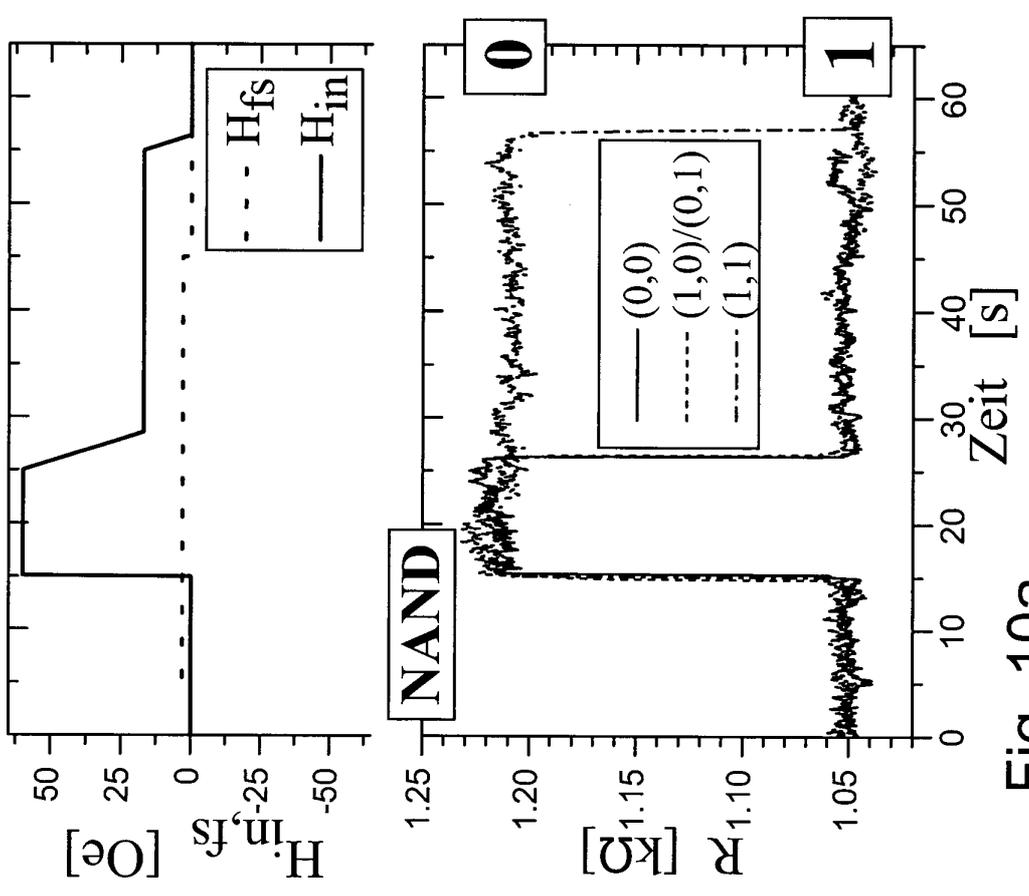


Fig. 10a

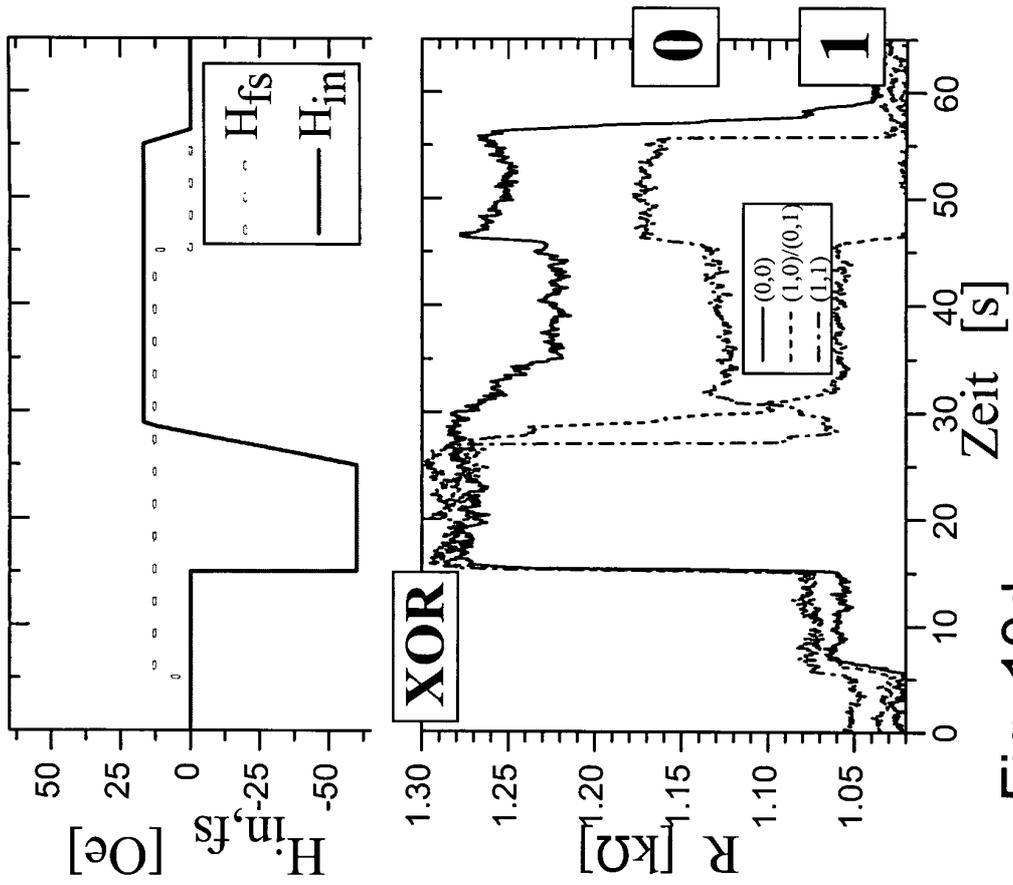


Fig. 10d

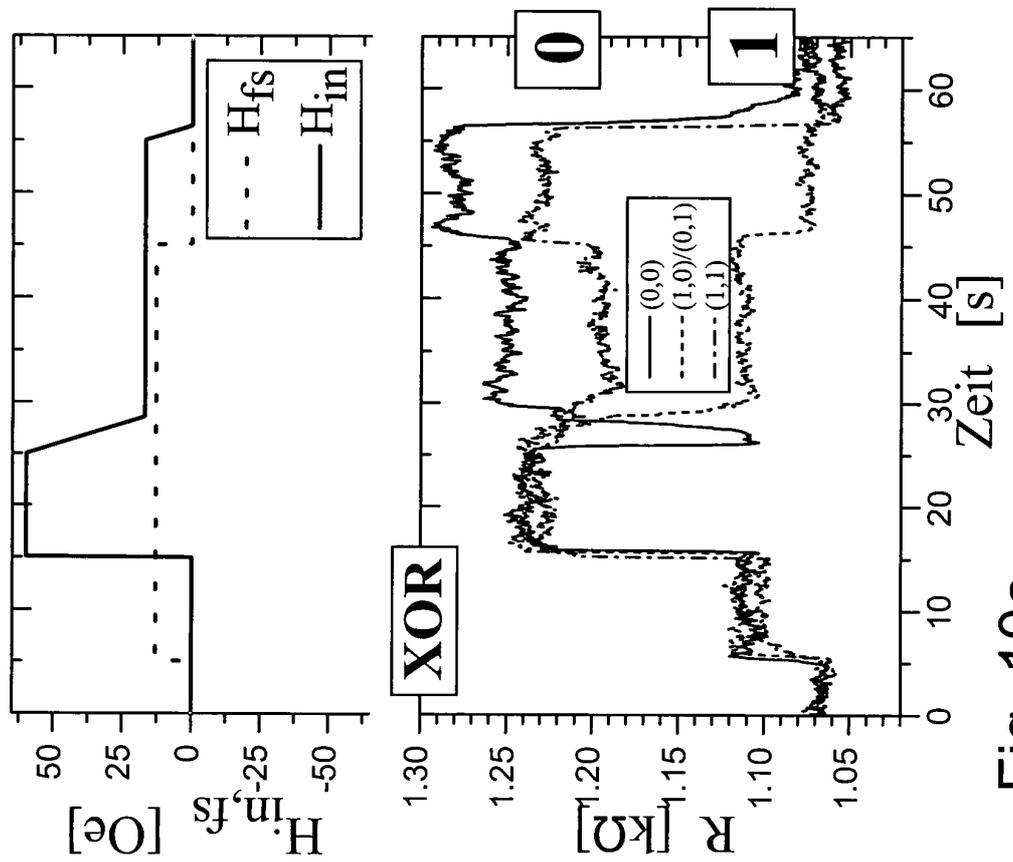


Fig. 10c