

Offenlegungsschrift

(43) Offenlegungstag: **10.09.2015**

Diagram illustrating a multi-layered structure 21, consisting of nine cylindrical layers (Cyl. 101 to Cyl. 109). A central square element 8 is connected to layers 104, 105, 106, and 107. Arrows indicate connections to labels 14, 16, 17, 18, and 20. A vertical arrow 19 points to the top layers, and a horizontal arrow 20 points to the right from the central element. A label 3 is at the top right.

Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft das Gebiet der Datenspeicherung, im Besonderen ein Verfahren und eine Vorrichtung für verteilte Schreibzugriffe bei Speichervorrichtungen mit überlappenden Datenspuren.

Stand der Technik

[0002] Eine Festplatte ist eine Speichervorrichtung, welche aus Platten besteht, deren Plattenoberflächen mit einer magnetischen Schicht beschichtet sind. Diese Platten rotieren um eine Achse, auch Spindel genannt, auf der die einzelnen Platten übereinander in einem Plattenstapel montiert sind. Jede Plattenoberfläche wird als Datenträgeroberfläche von einem beweglichen Schreib- und Leseelement in kreisförmigen, konzentrischen Spuren beschrieben und ausgelesen. Als Technologie für das Schreiben und Lesen ist Perpendicular Magnetic Recording (PMR) üblich. Bewegt werden die Schreib- und Leselemente, welche auch als Schreibleseköpfe (Heads) bezeichnet werden, von einem Actuator, so dass die Köpfe jede Spur im beschreibbaren Bereich der Plattenoberflächen ansteuern können. Der Actuator wird von einem Festplattencontroller gesteuert, welcher sich als interne Logik auch um die Optimierung der Schreib- und Lesezugriffe kümmert. Ebenfalls zu den Aufgaben des Festplattencontrollers gehört es, die einzelnen Spuren und Plattenoberflächen in einer geeigneten Reihenfolge zu beschreiben.

[0003] Alle konzentrischen Spuren, die übereinander im Plattenstapel liegen, werden Zylinder genannt. Die Begriffe Spur und Zylinder werden häufig synonym verwendet. Jede Spur auf den Plattenoberflächen wird in Form von Spurabschnitten in logische Einheiten unterteilt, in die sogenannten Sektoren. Diese Sektoren bilden Daten-Einheiten auf den einzelnen Spuren und werden häufig auch als Blöcke oder Datenblöcke bezeichnet und dürfen nicht mit dem geometrischen Sektor, dem Kreisausschnitt, verwechselt werden. Im folgenden wird ein Sektor, der sich auf einer Spur befindet, in Kurzform als Sektor bezeichnet.

[0004] Ein Sektor enthält traditionell 512 Byte, mittlerweile häufig 4 KB. Mittels Kontrollinformationen bzw. Fehlerkorrekturinformationen wird sichergestellt, dass die eingelesenen Daten des Sektors valide sind. Ein Sektor ist die kleinste adressierbare Daten-Einheit eines Dateisystems. Der Zugriff auf den Adressbereich der einzelnen Sektoren erfolgt seitens des Betriebssystems per Logical Block Addressing.

[0005] Die Plattenoberflächen werden in Zonen aufgeteilt, wobei innerhalb einer Zone alle Spuren die gleiche Anzahl an Sektoren haben (Zone bit recor-

ding). Von außen nach innen reduziert sich die Anzahl der Sektoren von Zone zu Zone.

[0006] Eingelesene Sektoren werden einer so genannten Vorwärts-Fehlerkorrektur (forward error correction) unterzogen. Dazu sind im Sektor zusätzliche Fehlerkorrektur-Informationen (error-correcting code) enthalten. Dennoch können die Sektoren so schlecht lesbar sein, dass z. B. mehrere Leseversuche notwendig sind, und/oder die Fehlerkorrektur kritisch ist. Ist der Sektor nicht mehr lesbar, so wird ein CRC-Fehler gemeldet.

[0007] Mittels Verwaltungsdaten „reparieren“ moderne Festplatten defekte Sektoren selbständig im regulären Betrieb. Der Festplattencontroller kann defekte oder schlecht lesbare Sektoren ausblenden und in einen Reservebereich (Sektor Spare Area) einblenden. Der defekte Sektor wird remappt, d. h. an einer anderen Stelle gespeichert. Der Verweis auf die Ersatz-Sektoren wird in einer G-Liste (Grown Defects) gespeichert. Für den Computer erscheint der Sektor weiterhin fehlerfrei. Jedoch können Sektoren, die sich in der G-Liste befinden, die Zugriffszeiten der Festplatte nachteilig beeinflussen, und wenn die G-Liste vollständig gefüllt ist, ist es Zeit, die Festplatte auszutauschen. Per S. M. A. R. T. wird dieser Vorgang protokolliert.

[0008] In der zum Prioritätsdatum der vorliegenden Patentanmeldung noch unveröffentlichten deutschen Patentschrift DE 10 2013 022 051.3 wird ein Verfahren beschrieben, wie defekte Sektoren lokal, d. h. ortsnahe ausgetauscht werden können. Somit ergibt sich eine Alternative zur Verwendung eines dezidierten Reservebereichs (Sektor Spare Area).

[0009] Zur Erhöhung der Speicherkapazität von Festplatten wird unter anderem der Spurbstand bzw. die Spurbreite der einzelnen konzentrischen Spuren auf den Plattenoberflächen verkleinert. Damit geht eine Verkleinerung der Schreib- und Leselemente einher. Ohne neue Speichertechniken ist jedoch mittlerweile eine Verkleinerung des Schreibelements kaum noch möglich, da anderenfalls das erzeugbare Magnetfeld zu klein für eine ausreichende Magnetisierung der einzelnen Bits auf der Plattenoberfläche ist. Die minimale Spurbreite eines aktiven Schreibvorgangs ist also limitiert.

[0010] Als Lösungsweg ist die Technik „Shingled Magnetic Recording“ (SMR) bekannt, bei der die Datenspuren mit einem überbreiten Schreibelement überlappend geschrieben werden, vergleichbar mit Dachschindeln. Die Patente US 8223458 und US 8432633 beschreiben weite Details dieser Technik.

[0011] Beim SMR werden die überlappenden Datenspuren in sogenannten Bändern gruppiert, welche je-

weils durch Inter-Band Gaps oder Guard Bands von einander getrennt sind. Diese Inter-Band Gaps oder Guard Bands werden im folgenden als Distanzbereiche bezeichnet oder auch als Distanzspuren, wenn die Breite des Distanzbereichs der Spurbreite entspricht.

[0012] Wenn der Inhalt eines Sektors in einem bereits belegten Bereich der SMR-Festplatte geändert werden soll, so müssen alle nachfolgenden Spuren des betroffenen Bandes bis hin zum Distanzbereich zunächst ausgelesen und gepuffert werden und anschließend wieder zurückgeschrieben werden, da anderenfalls das breite Schreibelement die nachfolgenden Spuren zerstören würde.

[0013] Bereits eine kleine Änderung des Inhalts im ersten Sektor eines Bandes macht es erforderlich, dass zusätzlich der gesamte Rest des Bandes eingelesen und zwischengespeichert wird, und dass nach der Aktualisierung des Inhalts im ersten Sektor das gesamte restliche Band wieder zurückgeschrieben wird. Aufgrund der sequenziellen und überlappenden Natur von SMR resultiert mithin aus einer kleinen Änderung in den zu speichernden Daten ein um Größenordnungen größerer Aufwand, der das Einlesen und erneute Schreiben eines ganzen Bandes umfasst und zu signifikanten Verzögerungen führen kann.

[0014] Der beschriebene Effekt wird als Read-Modify-Write oder als Write-Amplification bezeichnet und tritt insbesondere bei verteilten Schreibzugriffen zu Tage, wie sie z. B. in einer Datenbank vorkommen können, bei der häufig kleine Datenblöcke aktualisiert werden müssen. Des Weiteren bremst eine starke Fragmentierung eine SMR-Festplatte deutlich stärker aus als eine konventionelle Festplatte.

[0015] SMR-Festplatten sind aus diesen Gründen hauptsächlich für Cold-Storage-Anwendungen vorgesehen, also für Szenarien, in denen die Daten nur selten geändert werden. Als gleichwertiger und universeller Ersatz für konventionelle Festplatten (Drop-in-Replacement) sind SMR-Festplatten nach dem Stand der Technik nicht die erste Wahl. Für diesen Zweck gelten sie bisher als ungeeignet.

[0016] Bekannte Lösungen zur Linderung der Write-Amplification haben signifikante Nachteile. Bekannt ist die Möglichkeit, eintreffende verteilte Schreibzugriffe zunächst zu puffern, um diese dann später in größeren zusammenhängenden Blöcken zu schreiben. Dies funktioniert allerdings nur, solange der durchschnittliche Datendurchsatz der gesammelten verteilten Schreibzugriffe ausreichend niedrig ist. Ist der Bedarf an verteilten Schreibzugriffen dauerhaft zu groß für die geringe Schreibperformance der SMR-Festplatte, so läuft auch ein großer Pufferspeicher über und die Performance bricht drastisch ein. Des

weiteren kann, je nach Ausführungsform (z. B. Flash-Bausteine), ein zusätzlicher Pufferspeicher die Herstellungskosten der SMR-Festplatte erhöhen.

[0017] Ebenfalls bekannt sind Wear-Leveling und Garbage-Collection wie sie u. a. auch bei Solid State Disks (SSD) zum Einsatz kommen. Im Gegensatz zu konventionellen Festplatten gibt es bei diesen Verfahren keinen eindeutigen Bezug zwischen den Sektoradressen und den physikalischen Sektoren auf den Plattenoberflächen. Eine „Translation Layer“ sorgt für den Bezug zwischen dem Adressbereich des „Logical Block Addressing“ (LBA) und den physikalischen Sektoren. Viele bekannte Verfahren erfordern das interne Umkopieren der auf der SMR-Festplatte gespeicherten Daten. Die Transferraten können daher schwanken.

[0018] Im Patent US 7443625 wird ein Verfahren beschrieben, welches mit einer „ShiftAddress“-Tabelle arbeitet. Das Verfahren benötigt in regelmäßigen Intervallen eine Phase, in der die Tabelle bzw. die Spuren „aufgeräumt“ werden. Ist der Bedarf an verteilten Schreibzugriffen dauerhaft sehr groß, kann die Transferrate einbrechen.

[0019] Ein anderer Ansatz ist ein speziell an SMR angepasstes Dateisystem. In „Suresh, Anand/Gibson, Garth/Ganger, Greg: Shingled Magnetic Recording for Big Data Applications, CMU-PDL-12-105, May 2012, Parallel Data Laboratory, Carnegie Mellon University, Pittsburgh“ wird ein Dateisystem namens „ShingledFS“ beschrieben. Der Nachteil eines dezidierten SMR-Dateisystems liegt unter anderem darin, dass die Software in bestehenden Systemen aktualisiert werden muss, beispielsweise durch eine neue Betriebssystem-Version oder durch neue Treiber. Damit gehen ein zusätzlicher Aufwand und zusätzliche Risiken einher, welche die Attraktivität von SMR-Festplatten reduzieren und zwar mangels vollständiger Kompatibilität im Sinne eines Drop-in-Replacements.

[0020] Benötigt wird ein kostengünstiges Verfahren, welches es ermöglicht, SMR-Festplatten ohne signifikante Performance-Nachteile und unter Erhaltung der vollständigen Kompatibilität zu bestehenden, konventionellen Festplatten zu betreiben.

Darstellung der Erfindung

[0021] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren zu schaffen, welches es ermöglicht, Festplatten mit Shingled Magnetic Recording so zu betreiben, dass die Performance in den meisten Anwendungs-Szenarien und Einsatzgebieten, insbesondere bei verteilten Schreibzugriffen, ähnlich gute Werte erreicht wie konventionelle Festplatten. Die gefundene Lösung soll preiswert und kompatibel zur bestehenden Technik sein. Insbeson-

dere soll es nicht notwendig sein, ein bestehendes Dateisystem auszutauschen, und es soll einen eindeutigen Bezug zwischen den Sektoradressen und den physikalischen Sektoren auf den Plattenoberflächen geben.

[0022] Die Aufgabe wird mit den Merkmalen aus den unabhängigen Ansprüchen 1 und 12 gelöst, welche ein Verfahren und eine Vorrichtung definieren. Vorteilhafte Ausgestaltungen, mögliche Alternativen und optionale Funktionalitäten sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0023] Den Ansprüchen entsprechend handelt es sich um eine Speichervorrichtung und um ein Verfahren zum Speichern von Daten auf einer Datenträgeroberfläche unter Verwendung eines Leseelements und eines Schreibelements, wobei die Breite der vom Schreibelement geschriebenen Datenspur um eine Überbreite größer ist als die reguläre Spurbreite des Leselements.

[0024] Mindestens eine Teilmenge der Spuren auf den Datenträgeroberflächen ist in Bändern gruppiert. Je nach Ausführungsform befindet sich in der Nähe der Mitte eines Bandes oder bei den Bandgrenzen jeweils ein Distanzbereich, welcher zwischen den angrenzenden Spuren für einen Mindestabstand sorgt. Die Write-Amplifikation wird reduziert, indem die Bänder derart strukturiert sind, dass beidseitig, jeweils zwischen einer Position in der Nähe der Mitte eines Bandes und den beiden Bandgrenzen, überlappende Datenspuren mit entgegengesetzter Überlappungs-Richtung geschrieben werden. Hierzu wird das Schreibelement so ausgerichtet, dass die Distanzbereiche symmetrisch von beiden Seiten genutzt werden.

[0025] Des weiteren werden, je nach Ausführungsform, die Sektoradressen oder Adressen der Daten-Einheiten in Adressteilbereiche aufgeteilt, wobei eine Teilauswahl der Spuren pro Band jeweils einem Adressteilbereich zugeordnet wird, so dass beim Befüllen der Datenträgeroberflächen mit Daten, pro Band zunächst in einer ersten Phase überwiegend nur Spuren aus der erste Teilauswahl geschrieben werden, beispielsweise solche Spuren, die hinreichend auseinander liegen, so dass die Datenspuren des Schreibelements nicht überlappen.

[0026] Erst dann, wenn die Spuren dieser ersten Teilauswahl in allen oder in der Mehrzahl der Bänder überwiegend oder vollständig belegt sind, wird in mindestens einer weiteren Phase sukzessive damit begonnen, in jedem Band die restlichen Spuren zu beschreiben, wobei hierzu jeweils die Teilauswahl eines weiteren Adressteilbereichs verwendet wird.

[0027] Weitere Ausführungsformen verfügen über ein systemimmanentes Backup: Falls beim Lesen ei-

ner Spur ein Lesefehler durch einen defekten Sektor oder einen defekten Spurabschnitt auftritt, wird mittels Verwaltungsdaten oder durch einen Ähnlichkeitsvergleich geprüft, ob eine Nachbarspur oder eine weitere in der Nähe liegende Spur existiert, welche aufgrund der Überbreite des Schreibelements mit identischen Sektordaten beschrieben ist.

[0028] Optional kann ein Austausch eines defekten Sektors oder eines defekten Spurabschnitts erfolgen, indem der Distanzbereich auf die physikalische Position des defekten Sektors oder des defekten Spurabschnitts verschoben wird, und indem der frei gewordene, vormalige Distanzbereich ersatzweise zur Speicherung von Daten verwendet wird.

[0029] Die genannten und viele weitere Gesichtspunkte der Erfindung werden dem Fachmann nach dem Lesen der detaillierten Beschreibung zu den Ausführungsformen offenkundig.

Beschreibung der Zeichnungen

[0030] Zusätzliche Details zu den Ausführungsformen sowie beispielhafte Abläufe und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den bildlich dargestellten Merkmalen in den Zeichnungen.

[0031] Fig. 1 Festplattenlaufwerk

[0032] Fig. 2 Plattenstapel in der Seitenansicht

[0033] Fig. 3 Konventionelle Aufteilung der Spuren in Bänder

[0034] Fig. 4 Konventionelles Band mit überlappenden Spuren

[0035] Fig. 5 Symmetrisches Band mit Distanzbereich in der Mitte

[0036] Fig. 6 Lesen einer Spur mittels Leseelement

[0037] Fig. 7 Symmetrisches Band mit Distanzspuren an den Bandgrenzen

[0038] Fig. 8 Erste Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 50%

[0039] Fig. 9 Erste Ausführungsform, zweite Phase, vollständig belegt

[0040] Fig. 10 Flussdiagramm der ersten Ausführungsform

[0041] Fig. 11 Zweite Ausführungsform mit Distanzspuren an den Bandgrenzen

[0042] Fig. 12 Dritte Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 60%

[0043] Fig. 13 Dritte Ausführungsform, zweite Phase, Füllstand 80%

[0044] Fig. 14 Dritte Ausführungsform, dritte Phase, vollständig belegt

[0045] Fig. 15 Vierte Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 20%

[0046] Fig. 16 Vierte Ausführungsform, zweite Phase, Füllstand 40%

[0047] Fig. 17 Vierte Ausführungsform, fünfte Phase, vollständig belegt

[0048] Fig. 18 Fünfte Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 50%

[0049] Fig. 19 Fünfte Ausführungsform, zweite Phase, Füllstand 75%

[0050] Fig. 20 Fünfte Ausführungsform, dritte Phase, vollständig belegt

[0051] Fig. 21 Sechste Ausführungsform

[0052] Fig. 22 Siebte Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 60%

[0053] Fig. 23 Siebte Ausführungsform, dritte Phase, vollständig belegt

[0054] Fig. 24 Zugeordnete Adressteilbereiche der ersten Ausführungsform

[0055] Fig. 25 Virtuell verschobener Adressteilbereich für Dateiverwaltungstabelle

[0056] Fig. 26 Virtuell verschoben: Daten der Dateiverwaltungstabelle liegen nahe der Distanzspur

[0057] Fig. 27 Zugeordnete Adressteilbereiche der dritten Ausführungsform

[0058] Fig. 28 Modifizierte dritte Ausführungsform, erste Phase, Füllstand 40%

[0059] Fig. 29 Adressteilbereich der zweiten Phase mit Dateiverwaltungstabelle

[0060] Fig. 30 Erste und zweite Phase: Daten der Dateiverwaltungstabelle liegen nahe der Distanzspur

[0061] Fig. 31 Achte Ausführungsform mit Spuren und Distanzbereichen jeweils im Wechsel

[0062] Fig. 32 Neunte Ausführungsform mit „Config.“- und „Status“-Informationen und defekten Sektoren

[0063] Fig. 33 Bänder mit defekten Sektoren, die repariert werden können

[0064] Fig. 34 Rekonfigurierte Bänder, in denen die defekten Sektoren repariert sind

[0065] Fig. 35 Flussdiagramm für ein Backup und eine Reparatur defekter Sektoren

[0066] Fig. 36 Bänder einer weiteren Ausführungsform mit einem defekten Sektor

[0067] Fig. 37 Reparatur des defekten Sektors durch Verschieben der Bandgrenzen

Ausführung der Erfindung

[0068] Fig. 1 und Fig. 2 zeigen ein SMR-Festplattenlaufwerk **1** als Beispiel für eine Speichervorrichtung. Die Platten mit magnetischen Schichten auf den Plattenoberflächen **2** drehen um die Drehachse der Spindel **7**, an der die einzelnen Platten als Plattenstapel **13** befestigt sind. Die Spuren **3** auf den Plattenoberflächen **2** sind in Form von Spurabschnitten in Sektoren **6** unterteilt.

[0069] Zum Schreiben und Lesen von Spuren **3** werden die Schreibleseköpfe **8** des Plattenstapels **13** vom Actuator **9** auf die gewünschte Zylinderposition **12** bewegt, und zwar innerhalb des beschreibbaren Bereichs zwischen der äußersten Spur **4** und der innersten Spur **5**. Der Actuator **9** wird vom Festplattencontroller **10** gesteuert. Der Festplattencontroller **10** verfügt über einen Speicher **11**, welcher unter anderem Sektoren **6** oder Spuren **3** puffert.

[0070] Fig. 2 zeigt den Plattenstapel **13** in der Seitenansicht, welcher in diesem Beispiel aus drei Platten besteht. Jede Platte hat mit der Ober- und Unterseite zwei magnetische Schichten. Mithin gibt es im Beispiel sechs Plattenoberflächen **2**. Der Zylinder **12** umfasst alle konzentrischen Spuren **3**, die übereinander im Plattenstapel **13** liegen.

[0071] Die Spuren **3** sind in Form einer Zylindernummer durchnummeriert, gemäß Fig. 3 von Null bis m. Des weiteren werden die Spuren **3** für das Shingled Magnetic Recording in Bänder **15** gruppiert. Dementsprechend beginnt das 1. Band bei der äußersten Spur **4** und das n. Band endet bei der innersten Spur **5**.

[0072] Im Beispiel gemäß Fig. 3 bestehen die Bänder **15** aus je acht Spuren **3**, die zur Speicherung von Daten verwendet werden. Die jeweils neunte Spur fungiert als Distanzbereich **14**, auch bekannt als Inter-Band Gap oder Guard Band. Die Begriffe Inter-Band Gap oder Guard Band legen eine Eigenständigkeit nahe im Sinne eines separaten Platzhalters, welcher zwischen den einzelnen Bändern **15** für Distanz

sorgt. Jedoch werden in einigen Ausführungsformen dieser Patentschrift die Distanzbereiche **14** aus strukturellen Gründen als integraler Bestandteil der Bänder definiert.

[0073] Fig. 4 zeigt ein einzelnes Band **15**, und zwar als stark vergrößerter Ausschnitt von physikalischen Spuren **3**. Auf den Spuren **3** der Zylinder (Cyl.) 101 bis 108 sind Datenspuren **20** geschrieben, die Sektordaten enthalten. Die punktiert dargestellte Spur **3** auf Zylinder 109 ist der Distanzbereich **14**. Der Pfeil am Schreiblesekopf **8** gibt die relative Bewegungsrichtung an. Das Schreibelement **16** im Schreiblesekopf **8** ist um eine Überbreite **18** breiter als das Leselement **17**. In diesem Beispiel schreibt das Schreibelement **16** Datenspuren **20**, die doppelt so breit sind, wie die Spurbreite **19**, für die das Leselement **17** ausgelegt ist. Um wie dargestellt, die Spur **3** auf Zylinder 108 mit Sektordaten zu beschreiben, muss das breite Schreibelement **16** auf den Spuren **3** des Zylinderpaars (108, 109) positioniert werden.

[0074] In den Zeichnungen werden zwei verschiedene Muster verwendet, um die vom Schreibelement **16** geschriebenen Datenspuren **20** auf den einzelnen Spuren **3** besser kenntlich zu machen. Außerdem sind die kurzen Ausschnitte aus den Datenspuren **20** entlang der Schreibrichtung leicht versetzt dargestellt, damit die Überlappungen sichtbar werden. Die realen Sektoren **6**, welche per Datenspur **20** geschrieben werden, setzen sich in beide Richtungen entlang der Spuren **3** fort.

[0075] Die dargestellten Überlappungen verdeutlichen die Reihenfolge, in der die einzelnen Datenspuren **20** vom breiten Schreibelement **16** beschrieben werden. Durch das Überlappen halbiert sich in diesem Fall die resultierende Spurbreite **19**.

[0076] Der Distanzbereich **14** wird benötigt, um das Band **15** abzugrenzen, so dass das breite Schreibelement **16** keine Spuren **3** eines nachfolgenden Bandes **15** überschreibt. In der dargestellten Konfiguration belegt der Distanzbereich **14** eine einzelne Spur **3** und wird in diesem Fall als Distanzspur **14** bezeichnet. In anderen Ausführungsformen kann je nach Beschaffenheit des Schreiblesekopfes **8** die Breite des Distanzbereichs **14** auch größer sein, beispielsweise ein Vielfaches der Spurbreite **19**.

[0077] Aus dem Beispiel gemäß Fig. 4 ist ersichtlich, dass falls die Sektordaten auf der ersten Spur (Cyl. 101) geändert bzw. neu geschrieben werden sollen, die Daten aller nachfolgenden Spuren **3** bis zur Distanzspur **14** zunächst ausgelesen werden müssen, in einem Speicher **11** gepuffert werden müssen und anschließend zurückgeschrieben werden müssen, da bei Schreibvorgängen der Inhalt der jeweils nachfolgenden Spur **3** zerstört wird. Hierdurch entsteht eine Write-Amplification.

[0078] Fig. 5 zeigt ein neuartiges symmetrisches Band **21**. Auch in diesem Beispiel wird ein Schreiblesekopf **8** verwendet, dessen Schreibelement **16** um eine Überbreite **18** breiter ist als das Leseelement **17**. Das Schreibelement **16** erzeugt effektive Datenspuren **20**, die doppelt so breit sind wie die zugrunde gelegte Spurbreite **19**. Die Anzahl an Spuren **3** pro Band **21**, die zur Speicherung von Daten verwendet werden können, entspricht ebenfalls dem Beispiel aus Fig. 4. Hingegen unterscheidet sich das neuartige symmetrische Band **21** von konventionellen Bändern **15** durch die Position des Distanzbereichs bzw. der Distanzspur **14**, welche sich nunmehr in der Mitte des Bandes **21** befindet und zwar in diesem Beispiel auf Zylinder **105**. Somit ist die Distanzspur **14** ein integraler Bestandteil des Bandes **21**. Mehrere symmetrische Bänder **21** können aneinander gereiht werden, ohne dass ein weiterer, separater Distanzbereich **14** an den Grenzen der Bänder **21** für Abstand sorgt.

[0079] Die überlappenden Datenspuren **20** werden innerhalb eines Bandes **21** von außen nach innen beschrieben und zwar von beiden Seiten. Es ergibt sich eine Überlappung in zwei Richtungen, symmetrisch zur Distanzspur **14**. In Fig. 5 zeigen die gemustert dargestellten Datenspuren **20**, in welcher Reihenfolge die einzelnen Spuren **3** des Bandes **21** beschrieben werden müssen: Beispielsweise zuerst die Spur **3** des Zylinders 101 an der oberen Grenze des Bandes **21**; dann Zylinder 109 an der unteren Grenze des Bandes **21**; anschließend mit Zylinder 102 wieder eine Spur **3** aus der oberen Hälfte usw.

[0080] Die Überbreite **18** des Schreibelements **16** ist dabei immer zur Mitte hin auszurichten, damit die äußeren, bereits beschriebenen Spuren **3** nicht zerstört werden. Entscheidend ist, dass beim Beschreiben der beiden innersten Spuren **3** (Cyl. 104 und Cyl. 106), das Schreibelement **16** in beiden Fällen so positioniert wird, dass die Überbreite **18** des Schreibelements **16** von der Distanzspur **14** aufgefangen wird. Im Gegensatz zu der Anordnung aus Fig. 4 wird die Distanzspur **14** also gleichermaßen für zwei Spuren **3** des Bandes **21** als Ausweichbereich genutzt.

[0081] Da der Inhalt der Distanzspur **14** irrelevant ist, kann der zuvor von der oberen Spur (Cyl. 104) geschriebene Inhalt erfindungsgemäß mit der unteren Spur (Cyl. 106) überschrieben werden. Dieser Zustand entspricht der Darstellung in Fig. 5: Das aktive Schreibelement **16** schreibt mittels einer Datenspur **20** Sektordaten auf die letzte freie Spur (Cyl. 106) des Bandes **21**. Dazu muss das Schreibelement **16** über die Spuren **3** des Zylinderpaars (105, 106) positioniert werden. Die Distanzspur **14** auf Zylinder 105 wird dabei von der Datenspur **20** mit überschrieben. Der ehemalige Inhalt auf Zylinder 105 wird jedoch nicht benötigt, da er auf Zylinder 104 verortet ist.

[0082] Im Vergleich zur konventionellen Anordnung der Spuren **3** im Band **15** gemäß **Fig. 4** reduziert sich bei der neuen symmetrischen Anordnung die maximale Write-Amplifikation um mehr als die Hälfte: Wenn Sektordaten auf der ersten Spur (Cyl. 101) geändert werden sollen, müssen nur noch Daten auf drei statt zuvor auf sieben Spuren **3** zusätzlich eingelesen und erneut geschrieben werden. Die benötigte Zeit für das Update eines Sektors **6** im voll belegten Band **21** reduziert sich signifikant und in diesem Maße erhöht sich folglich die durchschnittliche Übertragungsrate bei verteilten Schreibzugriffen.

[0083] In **Fig. 6** ist dargestellt, wie aus dem vollständig belegten symmetrischen Band **21** die Spur **3** auf Zylinder 102 ausgelesen wird. Der Schreiblesekopf **8** wird dazu so positioniert, dass das aktive Leseelement **17** den Zylinder 102 auslesen kann. Die relative Bewegungsrichtung ist mit dem Pfeil am Schreiblesekopf **8** angegeben. Das Leseelement **17** ist für die Spurbreite **19** der Spuren **3** ausgelegt bzw. optimiert.

[0084] Die symmetrische Überlappung der geschriebenen Datenspuren **20** lässt sich auch in entgegengesetzter Richtung anordnen. Dies ist in **Fig. 7** dargestellt. Anstelle eines Distanzbereichs **14** in der Mitte des Bandes **21** laufen die Überlappungen der Datenspuren **20** in dieser Variante zwischen den Zylindern 104 und 105 auseinander. Die Distanzspuren **14** befinden sich stattdessen an der oberen und an der unteren Grenze des Bandes **22**. Die Distanzspuren **14** sind in diesem Fall separat und nicht als integraler Bestandteil der Bänder **22** definiert und werden sowohl vom vorhergehenden Band **22** als auch vom nachfolgenden Band **22** verwendet.

[0085] In **Fig. 7** zeigen die gemustert dargestellten Datenspuren **20**, in welcher Reihenfolge die einzelnen Spuren **3** des Bandes **22** beschrieben werden müssen, um die gewünschten Überlappungen zu erreichen, beispielsweise zuerst Zylinder 104 und Zylinder 105, dann Zylinder 103, dann Zylinder 106 usw. Die Übertragungsrate bei verteilten Schreibzugriffen entspricht den Werten des zuvor beschriebenen Bandes **21** gemäß **Fig. 5**.

[0086] Sektoren **6** sind Abschnitte einer Spur **3**. Die Begriffe „Sektor“ und „Spur“ sind daher technisch eng verwandt und je nach gewünschter Ausführungsform oft gleichermaßen zutreffend. Häufig steht der Überbegriff „Spur“ auch stellvertretend für einen Spurbereich aus der betrachteten Spur **3**. Immer wenn von einer Spur **3** die Rede ist, kann sich dies auch nur auf einen darauf befindlichen Sektor **6** beziehen. Umgekehrt, wenn von einem Sektor **6** oder einem Spurbereich die Rede ist, kann die betreffende Operation alternativ auch auf die gesamte Spur **3** angewendet werden.

[0087] Die Begriffe „Zylinder“ (bzw. Zylindernummer) und „Spur“ (bzw. Spurnummer) sind ebenfalls technisch eng verwandt. Immer wenn davon die Rede ist, dass ein Vorgang auf einer Spur **3** stattfindet, so betrifft dies in gleicher Weise auch den zugehörigen Zylinder **12**. Umgekehrt, wenn eine Zylindernummer erwähnt wird, so betrifft dies implizit auch mindestens eine der Spuren **3** auf diesem Zylinder **12**.

[0088] Wenn davon die Rede ist, dass eine Spur **3**, ein Band **15**, **21**, **22** oder Sektordaten „weiter oben“, „oberhalb“, „im vorderen Bereich“ oder „vorherig“ sind, so ist damit gemeint, dass sich diese Spur **3**, dieses Band **15**, **21**, **22** oder diese Sektordaten weiter außen auf den konzentrischen Spuren **3** der Plattenoberfläche **2** befinden und/oder eine kleinere Zylindernummer haben. Sind eine Spur **3**, ein Band **15**, **21**, **22** oder Sektordaten „weiter unten“, „unterhalb“, „im hinteren Bereich“ oder „nachfolgend“, so befinden sich diese Spur **3**, dieses Band **15**, **21**, **22** oder diese Sektordaten weiter innen auf den konzentrischen Spuren **3** der Plattenoberfläche **2** und/oder haben eine größere Zylindernummer.

[0089] Die in dieser Patentschrift verwendete Definition der Spurbreite **19** bei Shingled Magnetic Recording beruht auf der Breite der verbleibenden lesbaren Datenspur **20** nach dem Überlappen durch die benachbarte Datenspur **20**. Diese verbleibende lesbare Datenspur **20** ergibt die Spur **3**, für die das Leseelement **17** ausgelegt bzw. optimiert ist.

Erste Ausführungsform

[0090] **Fig. 8** und **Fig. 9** zeigen eine erste Ausführungsform. Wie in den vorangegangenen Beispielen wird ein Schreiblesekopf **8** verwendet, dessen Schreibelement **16** im Vergleich zum Leseelement **17** für das Schreiben von doppelt so breiten Datenspuren **20** ausgelegt ist.

[0091] Der Übersichtlichkeit halber und um die Größe der dargestellten Zahlen in den Zeichnungen überschaubar zu halten, enthält eine Plattenoberfläche **2** in dieser Ausführungsform nur 995 Spuren, gezählt von Zylinder 000 bis Zylinder 994. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass andere reale Ausführungsformen auch eine Spurnanzahl von beispielsweise mehreren Hunderttausend Spuren haben können und dass alle in dieser Patentschrift beschriebenen Verfahren mit beliebig großen Spurnanzahlen ausführbar sind.

[0092] Des weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Zeichnungen lediglich eine Plattenoberfläche **2** repräsentieren. Weitere Plattenoberflächen **2** werden in gleicher Weise befüllt. Für den Sonderfall, dass die SMR-Festplatte **1** nur aus einer Plattenoberfläche **2** besteht, veranschaulichen die Zeichnungen somit alle Spuren **3** dieser SMR-Festplatte **1**.

[0093] Die Spuren **3** werden in symmetrische Bänder **21** (analog zu **Fig. 5**) gruppiert, die in diesem Fall pro Band **21** aus vier nutzbaren Datenspuren **3** und einer in der Mitte liegenden Distanzspur **14** bestehen. Aufgrund der insgesamt 995 Spuren pro Plattenoberfläche **2** gibt es in dieser Ausführungsform 199 Bänder.

[0094] Hinsichtlich der Balance zwischen maximaler Speicherkapazität und maximaler Performance bei verteilten Schreibzugriffen ist die erste Ausführungsform auf Performance optimiert: 80% der Plattenoberfläche **2** werden zum Speichern von Daten genutzt, 20% sind für die Distanzspuren **14** reserviert. Durch die Halbierung der Spurbreite **19** per SMR erhöht sich die Kapazität gegenüber einer konventionellen Festplatte (ohne SMR) um 60%. Diese Prozentangaben gelten unabhängig von der Spuranzahl pro Plattenoberfläche **2** sowie unabhängig von der Anzahl an Plattenoberflächen **2**, die in der SMR-Festplatte **1** zum Einsatz kommen.

[0095] Mit der Spezifikation „ATA-2“ ist die Adressierungsmethode „Logical Block Addressing“ (LBA) definiert. Der Computer adressiert einen bestimmten Sektor **6** über eine fortlaufende Nummer, beginnend mit Null. Die Umrechnung zwischen dieser LBA-Nummer eines Sektors **6** und der physikalischen Zylinder/Kopf/Sektor-Position auf der SMR-Festplatte **1** erfolgt durch den Festplattencontroller **10**. Je nach vorhandener Festplattegeometrie muss bei der Umrechnung unter anderem auch die Aufteilung der Plattenoberflächen **2** in Zonen (Zone bit recording) berücksichtigt werden.

[0096] Die klassische Strategie bei älteren Festplatten besteht darin, beim Durchzählen der LBA-Nummern zunächst alle Sektoren **6** einer Spur **3** zu beschreiben und sobald diese Spur **3** voll ist, alle Schreibleseköpfe **8** im Plattenstapel **13** durchzuwechseln und erst dann als letzte Option den Zylinder **12** zu wechseln.

[0097] Das grundsätzliche Ziel ist es, die Zugriffszeiten zu minimieren, die bei einem Spur- bzw. Zylinderwechsel entstehen, und zwar bedingt durch eine erforderliche Justierung des Schreiblesekopfs **8** auf die neue Spur **3**. Auch bei einem Wechsel der Plattenoberfläche **2** im selben Zylinder **12** ist nach dem Umschalten auf den zuständigen Schreiblesekopf **8** eine erneute Justierung auf die neue Spur **3** erforderlich. Die hierfür benötigte Zeit wird im folgenden Settle-time genannt. Der Fachmann wird erkennen, dass in Abhängigkeit von der Spurdichte und den physikalischen Eigenschaften der SMR-Festplatte **1** unterschiedliche Strategien vorteilhaft sind.

[0098] Ist die benötigte Settle-time für das Umschalten auf den nächsten Schreiblesekopf **8** beispielsweise größer oder gleich groß wie die Zeit, die für

den Wechsel auf eine benachbarte Spur **3** der selben Plattenoberfläche **2** benötigt wird, so kann es vorteilhaft sein, zunächst eine einzelne Plattenoberfläche **2** zu beschreiben, indem der Schreiblesekopf **8** über alle Spuren **3** dieser Plattenoberfläche **2** bewegt wird, und indem erst danach auf den nächsten Schreiblesekopf **8** im Plattenstapel **13** umgeschaltet wird. Diese Strategie wird in den hier beschriebenen Ausführungsformen zu Grunde gelegt.

[0099] Andere Strategien können aber ebenfalls verwendet werden, denn die Zuordnung einer LBA-Nummer zu einer Spur **3** auf einer bestimmten Plattenoberfläche **2** wird vom Festplattencontroller **10** vorgenommen und ist nicht Gegenstand dieser Erfindung. Diese Zuordnung wird daher im folgenden allgemein ausgedrückt als Funktion:

$$c = g(a)$$

wobei a die LBA-Nummer eines Sektors **6** ist und c die zugehörige Zylindernummer.

[0100] In der ersten Ausführungsform sowie in den nachfolgenden Ausführungsformen wird die von $g(a)$ berechnete Zylindernummer c jedoch nicht direkt als Zylinderposition **12** verwendet, sondern als logischer Zylinderindex i :

$$i = g(a)$$

[0101] Der logische Zylinderindex i ist eine gedachte d. h. virtuelle Zylindernummer, die von ihrer linearen Anordnung her einer konventionellen Zylindernummer entspricht. Basierend auf diesem logischen Zylinderindex i wird mit Hilfe einer Index-Funktion $f(i)$ eine neuartige Reihenfolge festgelegt, in der die tatsächlichen, physikalischen Zylinder c (bzw. Spuren **3**) beschrieben werden:

$$c = f \tag{i}$$

[0102] In der ersten Ausführungsform sowie in den nachfolgenden Ausführungsformen ist der Wert der Index-Funktion $f(i)$ eine Zylindernummer c , die die tatsächliche, physikalische Position des Schreiblesekopfs **8** wiedergibt. Die Index-Funktion $f(i)$ nimmt folglich einen logischen Zylinderindex i entgegen und reorganisiert die Reihenfolge, in der die tatsächlichen, physikalischen Zylinder c (bzw. Spuren **3**) geschrieben werden. Somit ergibt sich für die LBA-Adressierung die Gesamtformel:

$$c = f(g(a))$$

wobei a die LBA-Nummer eines Sektors **6** ist und die Zylindernummer c die finale physikalische Zylinderposition **12** spezifiziert.

[0103] Fig. 8 und Fig. 9 veranschaulichen, wie die Spuren **3** einer SMR-Festplatte **1**, basierend auf der Index-Funktion $f(i)$, schrittweise gefüllt werden. Die Funktionswerte der Index-Funktion $f(i)$ können den Spalten „logic Cyl. idx. i“ und „phys. Cyl. c“ der Tabellen in Fig. 8 und Fig. 9 entnommen werden. Der Eingabewert „logic Cyl. idx. i“ ist der logische Zylinderindex i und der Funktionswert „phys. Cyl. c“ ist der physikalische Zylinder c .

[0104] In den Darstellungen der Ausführungsformen wird zunächst angenommen, dass das Betriebssystem ein Dateisystem verwendet, welches seine Dateiverwaltungstabelle (z. B. FAT) in Sektoren **6** mit niedrigen LBA-Nummern ablegt, beginnend mit einer Sektoradresse nahe Null. Bezogen auf eine konventionelle Festplatte wird hier die Dateiverwaltungstabelle also am Anfang der Platte abgelegt.

[0105] Weiterhin wird in der Darstellung angenommen, dass die SMR-Festplatte **1** frisch formatiert ist und dass in diesem leeren Zustand das Dateisystem neu geschriebene Dateien ebenfalls auf freien Sektoren **6** mit niedrigen LBA-Nummern ablegt. Bezogen auf eine konventionelle Festplatte bleibt der hintere Bereich der Festplatte (mit hohen Sektoradressen) zunächst frei. Mögliche Optimierungen für anders strukturierte Dateisysteme werden in einem späteren Abschnitt dieser Patentschrift beschrieben.

[0106] Alle adressierbaren Sektoren **6**, d. h. alle Sektoren **6** der SMR-Festplatte **1**, die beschrieben werden können, werden von der Funktion $f(g(a))$ in Adressteilbereiche aufgeteilt. In der ersten Ausführungsform werden zwei Adressteilbereiche verwendet. Der erste Adressteilbereich beinhaltet alle Sektoradressen von Null bis zur Hälfte der adressierbaren Sektoren **6**. Da vom Dateisystem zunächst Sektoradressen mit niedriger LBA-Nummer angefordert und beschrieben werden, befindet sich die SMR-Festplatte **1** bis zu einem Füllstand von 50% zunächst in einer ersten Phase, welche dem ersten Adressteilbereich zugeordnet ist.

[0107] Fig. 8 zeigt die Belegung der Spuren **3** auf einer Plattenoberfläche **2** bei einem Füllstand von 50%, d. h. die Hälfte aller verfügbaren Spuren **3** sind belegt. Verfügt die SMR-Festplatte **1** über weitere Plattenoberflächen **2**, so sind deren Spuren **3** auf die gleiche Weise belegt.

[0108] Wenn Sektoradressen angefordert werden, die aus dem ersten Adressteilbereich stammen, so werden die neuen Daten nur in einer bestimmten Teilauswahl von Spuren **3** geschrieben, welche mittels der Funktion $f(g(a))$ dem ersten Adressteilbereich zugeordnet sind. Für den ersten Adressteilbereich besteht diese Teilauswahl jeweils aus der oberen und der unteren Spur **3** eines jeden Bandes **21**, d. h. den

beiden Spuren **3** an den äußeren Grenzen der Bänder **21**.

[0109] Aus darstellungstechnischen Gründen wird in den Zeichnungen idealisiert angenommen, dass vom Dateisystem bis zu einem Füllstand von 50% keine Sektoradressen angefordert werden, welche oberhalb der Hälfte aller verfügbaren Sektoren **6** liegen, mithin sich im zweiten Adressteilbereich befinden. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das beschriebene Verfahren auch uneingeschränkt anwendbar ist, wenn beispielsweise bereits am Anfang – ausgehend von der leeren bzw. formatierten SMR-Festplatte **1** – kleinere Mengen von Sektoren **6** aus dem zweiten Adressteilbereich angefordert und geschrieben werden. Zu diesem Zweck wird dann vorübergehend in eine zweite Phase „gewechselt“, welche dem zweiten Adressteilbereich zugeordnet ist und weiter unten beschrieben wird. Die Phasen sind als didaktisches Hilfsmittel zu verstehen, welches die typische Reihenfolge beim Befüllen einer SMR-Festplatte **1** illustrieren und sollen nicht als festgelegte Reihenfolge oder als zwingend sequenzieller Ablauf aufgefasst werden. Ein beliebiger „Wechsel“ zwischen den einzelnen Phasen ist jederzeit und beliebig oft möglich und erfordert keinen besonderen oder zusätzlichen Aufwand.

[0110] Das Befüllen des ersten Adressteilbereichs erfolgt im Rahmen der ersten Phase gemäß Fig. 8, indem zunächst mittels der Funktion $g(a)$ der logische Zylinderindex einer angeforderten Sektoradresse ermittelt wird. Beispielsweise sind die ersten Sektoren **6** mit $a = 0$, $a = 1$, usw. dem logischen Zylinderindex $i = 0$ zugeordnet.

[0111] Diese ersten Sektoren **6** werden entsprechend der Index-Funktion $f(i)$ und mit $i = 0$ in die Spur **3** des physikalischen Zylinders **000** geschrieben. Das Schreibelement **16** mit Überbreite **18** wird dazu auf dem Zylinderpaar (**000**, **001**) positioniert. Im Anschluss wird mit dem logischen Zylinderindex $i = 1$ die Spur **3** des Zylinders **004** gefüllt, indem das Schreibelement **16** eine Datenspur **20** auf den Spuren **3** des Zylinderpaars (**003**, **004**) schreibt.

[0112] Sobald die beiden äußeren Spuren **3** vom 1. Band gefüllt sind, wird dieser Vorgang im 2. Band fortgesetzt: Mit Zylinderindex $i = 2$ werden die physikalischen Spuren der Zylinder **005** und **006** von der breiten Datenspur **20** beschrieben. Der Zylinderindex $i = 3$ positioniert das Schreibelement **16** auf das Zylinderpaar (**008**, **009**) usw. Die Überbreite **18** des Schreibelements **16** wird immer nach innen zur Mitte des jeweiligen Bandes **21** ausgerichtet.

[0113] Je nach Ausführungsform wird vom Festplattencontroller **10** für jeden Sektor **6** ein Flag verwaltet, welches anzeigt, ob der Sektor **6** belegt ist. Sobald ein Sektor **6** geschrieben wird, wird das zugehörige

Flag gesetzt. Dies ist in der Spalte „Belegt“ in der Tabelle aus **Fig. 8** dargestellt: Die äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** enthalten den Wert „1“ (d. h. „belegt“), die inneren Spuren **3** den Wert „0“.

[0114] Optional und je nach Ausführungsform können z. B. mittels einer ATA Trim-Funktion belegte Sektoren **6** vom Betriebssystem als ungültig markiert werden und zum direkten Überschreiben freigegeben werden. Dies wird erreicht, indem das Flag „Belegt“ wieder gelöscht, d. h. auf „0“ gesetzt wird.

[0115] Beim Befüllen einer leeren SMR-Festplatte **1**, welche aus mehreren Plattenoberflächen **2** besteht, werden zunächst die Spuren **3** des Zylinderpaars (000, 001) auf der ersten Plattenoberfläche **2** beschrieben. Anschließend, beim fortlaufenden Befüllen, erfolgt ein Spurwechsel zum Zylinderpaar (003, 004) und dann zum Zylinderpaar (005, 006) usw. – bis die erste Plattenoberfläche **2**, wie in **Fig. 8** dargestellt, zur Hälfte gefüllt ist. Erst dann erfolgt ein Umschalten des Schreiblesekopfs **8** auf die nächste, noch unbeschriebene Plattenoberfläche **2** im Plattenstapel **13**. Diese zweite Plattenoberfläche **2** sowie alle nachfolgenden Plattenoberflächen **2** werden auf die gleiche Weise von außen nach innen gefüllt, bis schlussendlich die gesamte SMR-Festplatte **1** zur Hälfte gefüllt ist.

[0116] Wie aus **Fig. 8** ersichtlich, entspricht die Distanz, die der Schreiblesekopf **8** bei einem Spurwechsel innerhalb einer Plattenoberfläche **2** zurücklegen muss, in etwa der Distanz, die der Schreiblesekopf **8** auch bei einer konventionellen Festplatte ohne SMR zurücklegen müsste. Lediglich bei jedem zweiten Spurwechsel (innerhalb eines Bandes **18**) vergrößert sich die Distanz des Spurwechsels um die Breite der Distanzspur **14**, mithin um die halbe Breite einer konventionellen Spur.

[0117] Aus **Fig. 8** ist ferner ersichtlich, dass es in der ersten Phase zu keinen Überlappungen der geschriebenen Datenspuren **20** kommt. Solange die SMR-Festplatte **1** nicht mehr als zu 50% gefüllt ist, erreicht die SMR-Festplatte **1** bei verteilten Schreibzugriffen folglich eine Performance, die in etwa einer konventionellen Festplatte ohne SMR entspricht. Alle Daten können ohne Zeitverlust (d. h. ohne Write-Amplifikation) direkt überschrieben werden. Ein Auslesen, Puffern und erneutes Schreiben von überlappenden Datenspuren **20** ist nicht notwendig.

[0118] In vielen typischen Anwendungsszenarien, beispielsweise im Home-/Office-Bereich, ist eine Festplatte lange Zeit nur teilweise belegt. Der Einsatz einer SMR-Festplatte **1** mit den Eigenschaften der ersten Ausführungsform hat folglich keinen nennenswerten Nachteil hinsichtlich der Performance und kann somit als gleichwertiger Ersatz für eine konventionelle Festplatte eingestuft werden, wobei die Kapa-

azität der SMR-Festplatte **1** dank der erhöhten Spurdichte größer ist.

[0119] Sobald der letzte Sektor **6** aus dem ersten Adressteilbereich belegt ist, ist die erste Phase abgeschlossen: Die innerste Spur **5** auf der letzten verfügbaren Plattenoberfläche **2** im Plattenstapel **13** ist beschrieben: In **Fig. 8** ist dies die Datenspur **20** auf dem Zylinderpaar (993, 994) aus dem 199. Band. Diese hat den Zylinderindex $i = 397$. Die SMR-Festplatte **1** hat nunmehr einen Füllstand von 50%.

[0120] Ab diesem Zeitpunkt wechselt die SMR-Festplatte **1** in eine zweite Phase, welche dem zweiten Adressteilbereich zugeordnet ist. Ausgehend vom Zustand am Ende der ersten Phase, wird vom Schreibelement **16** der letzten Plattenoberfläche **2** wieder zum Schreibelement **16** der ersten Plattenoberfläche **2** umgeschaltet und der Schreiblesekopf **8** springt von der innersten Spur **5** wieder nach außen, und zwar auf das Zylinderpaar (001, 002) des 1. Bandes.

[0121] Bei fortgesetzter Befüllung der SMR-Festplatte **1** mit Daten werden von nun an die beiden inneren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** belegt. Dies ist in **Fig. 9** dargestellt. Die Überbreite **18** der Datenspur **20** des Schreibelements **16** wird von der Distanzspur **14** aufgefangen, an welche die beiden inneren Spuren **3** angrenzen. Der Inhalt auf der Distanzspur **14** wird nicht benötigt. Daher kann die Distanzspur **14** von beiden Seiten mit der Überbreite **18** des Schreibelements **16** überschrieben werden.

[0122] Mit jedem neu beschriebenen Sektor **6** oder, je nach Ausführungsform, mit jeder neu geschriebenen Spur **3** ist das Flag „Belegt“ zu setzen, um zu vermerken, dass der Sektor **6** oder die Spur **3** gültige Daten enthält.

[0123] Entsprechend der Index-Funktion $f(i)$ wird mit $i = 398$ zunächst das Zylinderpaar (001, 002) mit einer Datenspur **20** beschrieben. Anschließend wechselt das Schreibelement **16** mit $i = 399$ zum Zylinderpaar (002, 003), dann mit $i = 400$ zum Zylinderpaar (006, 007) und so weiter, bis mit $i = 795$ und dem Beschreiben der Spuren **3** des Zylinderpaars (992, 993) die erste Plattenoberfläche **2** vollständig belegt ist. Je nach Anzahl an Platten im Plattenstapel **13** wird dieser Vorgang auf den verbleibenden Plattenoberflächen **2** wiederholt, bis der zweite Adressteilbereich und mithin auch die gesamte SMR-Festplatte **1** vollständig belegt ist. Dieser Zustand ist in **Fig. 9** dargestellt.

[0124] Um jederzeit und insbesondere bei jedem Füllstand verteilte Schreibzugriffe im belegten Bereich der SMR-Festplatte **1** zu ermöglichen, muss vor dem Schreiben eines Sektors **6** auf einer der beiden äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** geprüft werden, ob sich bereits gültige Daten auf der benach-

barten, inneren Spur **3** befinden. Für diese Schreibvorgänge aus dem ersten Adressteilbereich wird jeweils das Flag „Belegt“ der inneren Spur **3** ausgewertet. Beispielsweise muss vor jedem Schreibvorgang auf die Spur **3** mit der Zylindernummer 000 geprüft werden, ob sich bereits gültige Daten auf der inneren, benachbarten Spur **3** mit der Zylindernummer 001 befinden. Ist das entsprechende Flag gesetzt („1“), so muss der Sektor **6** oder die Spur **3** des Zylinders 001 zunächst ausgelesen werden und abschließend, nach dem Update der äußeren Spur **3**, wieder zurückgeschrieben werden. Anderenfalls, wenn das Flag nicht gesetzt ist („0“), kann die äußere Spur **3** direkt geschrieben werden und zwar durch Beschreiben des Zylinderpaars (000, 001) mit der Datenspur **20**.

[0125] Bei verteilten Schreibzugriffen auf die vollständig gefüllte SMR-Festplatte **1** gibt es pro Band **21** zwei Spuren **3**, die direkt überschrieben werden können, nämlich die Nachbarspuren zur Distanzspur **14**, und zwei Spuren **3** an den Grenzen des Bandes **21**, bei denen es zu einer Write-Amplification kommt: Statistisch ergibt sich bei einer vollständig gefüllten SMR-Festplatte **1** somit die Situation, dass 50% der Schreibzugriffe sofort ausgeführt werden können und dass bei den übrigen 50% ein geringfügiges Read-Modify-Write für eine einzige Spur **3** ausgeführt werden muss. Folglich ist auch in diesem Extremfall einer vollständig gefüllten SMR-Festplatte **1** die Performance hinreichend konkurrenzfähig zu einer konventionellen Festplatte ohne SMR.

[0126] Bei einem Füllstand von beispielsweise 75% ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein verteilter Schreibzugriff auf den belegten Teil ohne Write-Amplification ausgeführt werden kann 66.6%. Nur in 33.3% der Fälle kommt es zu einem Read-Modify-Write. Das prozentuale Verhältnis wird zunehmend günstiger, je niedriger der Füllstand ist. Beim Hinzufügen neuer Daten im unbelegten, hinteren Teilbereich der SMR-Festplatte **1** entsteht in der ersten Ausführungsform grundsätzlich keine Write-Amplification.

[0127] Das Verfahren der ersten Ausführungsform und/oder weiterer Ausführungsformen zeichnet sich dadurch aus, dass sich neu oder kürzlich hinzugefügte Sektordaten im Regelfall besonders schnell, d. h. ohne Write-Amplification ändern lassen, und zwar unabhängig vom aktuellen Füllstand der SMR-Festplatte **1**.

[0128] Dieses Merkmal, dass Änderungen an den neu hinzugefügten Sektordaten bei jedem Füllstand sofort ausgeführt werden können, basiert auf der speziellen Reihenfolge, mit der die Spuren **3** beschrieben werden. Die Reihenfolge sorgt dafür, dass neu geschriebene Datenspuren **20** möglichst lange in ihrer vollen Breite erhalten bleiben, bevor sie teilweise (d. h. überlappend) von der Nachbarspur überschrie-

ben werden. Die Erfindung berücksichtigt somit, dass neu hinzugefügte Dateien in der Regel öfter geändert werden und optimiert somit die Performance bei verteilten Schreibzugriffen.

[0129] Die erste Ausführungsform und weitere Ausführungsformen profitieren in doppelter Weise von einer klassischen Datei-Defragmentierung. Bei konventionellen Festplatten sorgt dieses bekannte Verfahren durch ein Zusammenlegen von fragmentierten Dateien dafür, dass diese Dateien schneller und in einem einzigen Durchgang gelesen und geschrieben werden können. Ziel ist es, die nötigen Bewegungen des Schreiblesekopfs **8** zu minimieren. Die defragmentierten Dateien werden dazu typischerweise lückenlos im vorderen Bereich der Festplatte abgelegt. Die ungültig gewordenen Sektoren **6** im hinteren Bereich der Festplatte können beispielsweise mittels einer ATA Trim-Funktion freigegeben werden.

[0130] In der ersten Ausführungsform entspricht der vordere Bereich der SMR-Festplatte **1** dem ersten Adressteilbereich, bei dem im Rahmen der ersten Phase die äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** beschrieben werden. Dadurch sorgt die Defragmentierung automatisch dafür, dass, je nach Füllstand der SMR-Festplatte **1**, weniger Überlappungen der Datenspuren **20** verbleiben.

[0131] Betrachtet wird beispielsweise eine halbvolle und stark fragmentierte SMR-Festplatte **1** der ersten Ausführungsform mit vielen überlappenden Datenspuren **20**, verteilt über alle Plattenoberflächen **2**. Nach dem Defragmentieren befinden sich alle Datenspuren **20** überlappungsfrei nur noch auf den äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21**, so dass nunmehr die SMR-Festplatte **1** eine vergleichbare Performance aufweist, wie eine konventionelle Festplatte, da keine Read-Modify-Write notwendig ist. Durch eine Defragmentierung wird in der ersten Ausführungsform und in weiteren Ausführungsformen die Write-Amplification signifikant reduziert.

[0132] Fig. 10 zeigt das Flussdiagramm der ersten Ausführungsform, wobei die angegebenen Formeln für eine beliebige Spuranzahl auf den Plattenoberflächen **2** Gültigkeit haben. Die Spuranzahl wird durch die Anzahl n der verfügbaren Bänder **21** definiert, wobei n multipliziert mit fünf Spuren pro Band **21** die gesamte Spuranzahl ergibt. Ferner hat die betrachtete SMR-Festplatte **1** eine Gesamtkapazität von A Sektoren **6**, das heißt A Sektoren **6** können adressiert und beschrieben werden.

[0133] In der ersten Operation **23** nimmt der Festplattencontroller **10** vom Computer die LBA-Nummer a des Sektors **6** entgegen, der geschrieben werden soll, beispielsweise im Rahmen von verteilten Schreibzugriffen. Die nachfolgende Operation **24** be-

rechnet vorab den logischen Zylinderindex i , wobei a die LBA-Nummer des Sektors **6** ist:

$$i = g(a)$$

[0134] Der erste Adressteilbereich liegt im Intervall von Null bis zur Hälfte aller adressierbaren Sektoren **A**. Die Verzweigung **25** prüft, ob die entgegengenommene Sektoradresse a im ersten Adressteilbereich oder im zweiten Adressteilbereich liegt, mithin, ob die erste oder die zweite Phase zuständig ist:

$$a < \frac{A}{2}$$

[0135] Ist die Ungleichung nicht erfüllt, so liegt die Sektoradresse a im zweiten Adressteilbereich und die zweite Phase ist zuständig. In diesem Fall liegt der angeforderte Sektor **6** auf einer der inneren Spuren **3** eines Bandes **21** und kann direkt beschrieben werden.

[0136] Dazu wird in Operation **26** das Zylinderpaar (c, d) ermittelt, auf dessen Spuren **3** das Schreibelement **16** positioniert werden muss, um die breite Datenspur **20** zu schreiben. Die zu schreibenden Sektordaten liegen auf der Zylindernummer c , und d ist die Zylindernummer der Distanzspur **14**, welche für die Überbreite **18** des Schreibelements **16** benötigt wird. Die Berechnung der physikalischen Zylindernummern c und d erfolgt mittels der Index-Funktion $f(i)$, welche sich allgemein wie folgt ausdrücken lässt, wobei „div“ eine ganzzahlige Integer-Division ist und „mod“ der ganzzahlige Rest dieser Division ist.

$$j = i - 2 \cdot n$$

$$c = 5 \cdot (j \text{ div } 2) + 2 \cdot (j \text{ mod } 2) + 1$$

$$d = 5 \cdot (j \text{ div } 2) + 2$$

[0137] Die Operation **27** positioniert das Schreibelement **16** nunmehr über diesem Zylinderpaar (c, d) und als nächstes wird in Operation **28** das Flag des Sektors **6** als „belegt“ markiert, so dass abschließend in Operation **29** der Schreibvorgang der Datenspur **20** mit den Sektordaten erfolgen kann.

[0138] Falls gemäß Verzweigung **25** die Sektoradresse a auf den ersten Adressteilbereich verweist, mithin auf die erste Phase, wird mittels der Operation **30** berechnet, auf welches Zylinderpaar (c, d) das Schreibelement **16** in diesem Fall auszurichten ist. Dabei ist c die Zylindernummer einer Spur **3**, welche an einer der Grenzen der Bänder **21** liegt, und d die nach innen benachbarte Spur **3**.

$$c = 5 \cdot (i \text{ div } 2) + 4 \cdot (i \text{ mod } 2)$$

$$d = 5 \cdot (i \text{ div } 2) + 2 \cdot (i \text{ mod } 2) + 1$$

[0139] Die Nachbarspur mit der Zylindernummer d wird aufgrund der Überbreite **18** des Schreibelements **16** mit überschrieben. Daher muss geprüft werden, ob sich auf dieser Nachbarspur gültige Daten, d. h. bereits belegte Sektoren **6** befinden. Im Rahmen der Verzweigung **31** wird dazu das „Belegt“-Flag des entsprechenden Sektors **6** auf Zylinder d ausgewertet.

[0140] Wenn der Sektor **6** auf Zylinder d nicht belegt ist, so kann umgehend mit dem Schreibvorgang begonnen werden: In Operation **32** wird das Schreibelement **16** auf das Zylinderpaar (c, d) positioniert. In Operation **33** wird der zu schreibende Sektor **6** auf Zylinder c als „belegt“ markiert, und in Operation **34** werden die Sektordaten schlussendlich auf das Spurpaar geschrieben.

[0141] Anderenfalls, wenn der Sektor **6** auf Zylinder d bereits mit gültigen Daten belegt ist, muss entsprechend der Verzweigung **31** der Sektor **6** auf Zylinder d zunächst mittels des Leselements **17** ausgelesen und im Pufferspeicher **11** zwischengespeichert werden. Dieser Vorgang wird im Flussdiagramm von der Operation **35** durchgeführt.

[0142] In der nachfolgenden Operation **36** wird das Schreibelement **16** auf das Zylinderpaar (c, d) positioniert. In Operation **37** wird der neu zu schreibende Sektor **6** auf Zylinder c als „belegt“ gekennzeichnet, und in Operation **38** werden die Daten dieses Sektors **6** auf das Spurpaar geschrieben.

[0143] Abschließend müssen mit Operation **39** die im Pufferspeicher **11** zwischengespeicherten Daten auf die Nachbarspur mit der Zylindernummer d zurückgeschrieben werden, da diese Daten durch den vorherigen Schreibvorgang überschrieben worden sind. Das Schreibelement **16** wird dazu so positioniert, dass seine Überbreite **18** von der benachbarten Distanzspur **14** aufgefangen wird.

Zweite Ausführungsform

[0144] Fig. 11 zeigt eine zweite Ausführungsform. Diese entspricht der ersten Ausführungsform gemäß Fig. 8 und Fig. 9 mit dem Unterschied, dass die Überlappungen der geschriebenen Datenspuren **20** in die entgegengesetzte Richtung angeordnet sind. Analog zum Beispiel aus Fig. 7 laufen die Überlappungen in dieser Variante in der Mitte der Bänder **22** auseinander. Die Distanzspuren **14** befinden sich stattdessen als eigenständige Bereiche zwischen den Bändern **22**. Die Zuordnung einer Distanzspur **14** zu einem Band **22** ist eine formale Definition und hat keinen Einfluss auf die vorliegende Erfindung.

[0145] In der Darstellung gemäß Fig. 11 ist die SMR-Festplatte **1** vollständig gefüllt. Auch in dieser Ausführungsform gibt der logische Zylinderindex aus der Tabellenspalte „logic Cyl. idx. i“ an, in welcher Rei-

henfolge die Spuren **3** einer leeren SMR-Festplatte **1** gefüllt werden. So werden in diesem Fall zunächst die beiden inneren Spuren **3** eines jeden Bandes **22** beschrieben und erst später die beiden äußeren Spuren **3**.

[0146] Die invertierte Anordnung der Überlappungen in der zweiten Ausführungsform hat vergleichbare Performance-Werte und vergleichbare Eigenschaften wie die erste Ausführungsform und wird im gleichen Maße präferiert. Auf weitere Darstellungen mit einer invertierten Anordnung der überlappenden Datenspuren **20** wird lediglich verzichtet, um die Anzahl der Zeichnungen überschaubar zu halten.

Dritte Ausführungsform

[0147] Fig. 12, Fig. 13 und Fig. 14 zeigen eine dritte Ausführungsform. Wie bei der ersten Ausführungsform werden symmetrische Bänder **21** mit einer Distanzspur **14** in der Mitte verwendet. Das Verhältnis der Spurbreite **19** des Leseelements **17** zur Spurbreite des Schreibelements **16** beträgt auch hier 1 zu 2. In der dritten Ausführungsform bestehen die Bänder **21** jedoch aus insgesamt elf Spuren **3**, von denen zehn zum Speichern von Daten verwendet werden können. Auf einer Plattenoberfläche **2** befinden sich in diesem Beispiel 990 Spuren, gezählt von Zylinder 000 bis Zylinder 989, die zu 90 Bändern gruppiert sind.

[0148] Durch die größere Spuranzahl pro Band **21** hat die dritte Ausführungsform im Vergleich zur ersten Ausführungsform eine größere Speicherkapazität: ca. 91% der Plattenoberfläche **2** werden zum Speichern von Daten genutzt, ca. 9% sind für die Distanzspuren **14** reserviert. Durch die Erhöhung der Spurdichte per SMR erhöht sich die Kapazität gegenüber einer konventionellen Festplatte (ohne SMR) um 81,8%.

[0149] Die Funktionswerte der Index-Funktion $f(i)$ in der dritten Ausführungsform können den Spalten „logic Cyl. idx. i“ und „phys. Cyl. c“ der Tabellen in Fig. 12, Fig. 13 und Fig. 14 entnommen werden. Ist eine Spur **3** mit einem Sektor **6** belegt, so wird dies in der Spalte „Belegt“ mit einer „1“ angegeben.

[0150] In der dritten Ausführungsform verfügt die SMR-Festplatte **1** über eine Kapazität von insgesamt A Sektoren **6**. Dieser Adressbereich von Null bis A wird von der Funktion $f(g(a))$ in drei Adressteilbereiche aufgeteilt. Der erste Adressteilbereich umfasst die ersten 60% der adressierbaren Sektoren **6**, mithin alle Sektoradressen im Intervall zwischen Null und 0.6 A. Der zweite und dritte Adressteilbereich umfasst die Sektoradressen aus den Intervallen 0.6 A bis 0.8 A und 0.8 A bis A, mithin die Sektoren **6**, die ab einem Füllstand von 60% und 80% in Anspruch genommen werden.

[0151] Der Anschaulichkeit halber werden die drei Adressteilbereiche einer ersten, zweiten und dritten Phase zugeordnet. Diese drei Phasen sind für das Befüllen der leeren SMR-Festplatte **1** zuständig:

Fig. 12 zeigt das Ende der ersten Phase, welche erreicht ist, sobald 60% jeder Plattenoberfläche **2** beschrieben ist. Mithin sind pro Band **21** sechs von zehn verfügbaren Datenspuren **3** beschrieben. Es ist zu erkennen, dass in dieser ersten Phase die Teilauswahl von Spuren **3** so gewählt ist, dass es beim Schreiben der Datenspuren **20** – mit Ausnahme der Distanzspuren **14** – zu keinen Überlappungen kommt. Beispielsweise wird gemäß der Nummerierung des „logic Cyl. idx. i“ zuerst das Zylinderpaar (000, 001), dann das Zylinderpaar (002, 003), dann das Zylinderpaar (004, 005) und nach der Distanzspur **14** das Zylinderpaar (005, 006) beschrieben.

[0152] In der ersten Phase und bei einem kontinuierlichem Befüllen der SMR-Festplatte **1** mit Daten entspricht die Distanz, die der Schreiblesekopf **8** bei einem Spurwechsel zurücklegen muss, der Distanz, die der Schreiblesekopf **8** auch bei einer konventionellen Festplatte (mit doppelter Spurbreite) zurücklegen müsste. Bei den zur Distanzspur **14** benachbarten Spuren **3** ist die Distanz für einen Spurwechsel sogar kleiner als bei einer konventionellen Festplatte. Bei verteilten Schreibzugriffen auf bereits belegte Teile der SMR-Festplatte **1** ist kein Read-Modify-Write erforderlich und zwar bis zu einem Füllstand von 60%. In dieser Phase entspricht die Performance der SMR-Festplatte **1** bei verteilten Schreibzugriffen in etwa einer konventionellen Festplatte.

[0153] Sobald mit dem logischen Zylinderindex $i = 539$ das letzte Zylinderpaar (988, 989) beschrieben ist, wird die Plattenoberfläche **2** gewechselt, bis alle Plattenoberflächen **2** im Plattenstapel **13** beschrieben sind und somit das Ende der ersten Phase erreicht ist. Mit Beginn der zweiten Phase wird wieder zum Anfang der ersten Plattenoberfläche **2** gewechselt.

[0154] Fig. 13 zeigt das Ende der zweiten Phase, welche erreicht ist, sobald 80% jeder Plattenoberfläche **2** beschrieben ist. Somit sind pro Band **21** acht von zehn verfügbaren Datenspuren **3** beschrieben.

[0155] Die zweite Phase ist zuständig für einen logischen Zylinderindex von $i = 540$ bis $i = 719$. Basierend auf der Umrechnung durch die Index-Funktion $f(i)$ werden beispielsweise Daten auf den Spuren **3** der beiden Zylinder 003 und 007 im 1. Band hinzugefügt. Hierzu wird mit dem Schreibelement **16** jeweils eine Datenspur **20** auf die Zylinderpaare (003, 004) und (006, 007) geschrieben. Da die bereits belegten Spuren **3** auf Zylinder 004 und 006 dabei überschrieben werden, ist nunmehr ein Read-Modify-Write erforderlich.

[0156] Unter den noch unbelegten Spuren **3** pro Band **21** werden in der zweiten Phase grundsätzlich jene Spuren **3** ausgewählt, die möglichst dicht an der Distanzspur **14** liegen, womit in diesem Fall eine Write-Amplifikation entsteht, die lediglich das Beschreiben einer einzelnen, zusätzlichen Spur **3** erfordert. Somit lässt sich bis zu einem Füllstand von 80% eine gute Performance bei verteilten Schreibzugriffen erreichen.

[0157] Auf dem 90. Band werden die Zylinderpaare (982, 983) und (985, 986) mit einer Datenspur **20** beschrieben und somit Sektordaten auf den Spuren **3** der Zylinder 982 und 986 hinzugefügt. Anschließend wird jeweils auf die nächste Plattenoberfläche **2** im Plattenstapel **13** gewechselt, bis abschließend zur dritten Phase übergegangen wird.

[0158] Fig. 14 zeigt die Spuren **3** der vollständig belegten Plattenoberfläche **2** am Ende der dritten und letzten Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 720$ bis $i = 899$ zuständig ist. Ergänzt werden die jeweils letzten freien Spuren **3** pro Band **21**, beispielsweise auf Zylinder 001 und 009 im 1. Band. Hierbei, entsteht eine erhöhte Write-Amplifikation, da zum Beschreiben der letzten freien Spuren **3** ein Read-Modify-Write für jeweils drei Spuren **3** durchgeführt werden muss. Die letzten 20% Speicherkapazität der SMR-Festplatte **1** bilden somit eine Kapazitätsreserve, die mit reduzierter, aber brauchbarer Performance genutzt werden kann.

Vierte Ausführungsform

[0159] Fig. 15, Fig. 16 und Fig. 17 zeigen eine vierte Ausführungsform. Sie entspricht hinsichtlich der Spuranzahl, der Bandanzahl, der Kapazität, dem Adressbereich der Sektoren **6** (von Null bis A) und dem Schreiblesekopf **8** der dritten Ausführungsform, mit dem Unterschied, dass die einzelnen Spuren **3** in dieser Variante mit einer anderen Strategie, d. h. in einer anderen Reihenfolge beschrieben werden. Zu diesem Zweck wird der Adressbereich von der Funktion $f(g(a))$ in fünf Adressteilbereiche aufgeteilt, die jeweils 20% der adressierbaren Sektoren **6** umfassen, mithin in Adressteilbereiche mit Intervallen von Null bis 0.2 A, 0.2 A bis 0.4 A, 0.4 A bis 0.6 A, 0.6 A bis 0.8 A und 0.8 A bis A. Der Anschaulichkeit halber wird eine leere SMR-Festplatte **1** im folgenden in fünf Phasen befüllt, wobei in jeder Phase eine Teilauswahl von zwei weiteren Spuren **3** pro Band **21** ergänzt wird.

[0160] In der ersten Phase, dargestellt in Fig. 15, werden jeweils die beiden äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** mit Sektordaten belegt, beispielsweise durch Schreiben je einer Datenspur **20** auf die Zylinderpaare (000, 001) und (009, 010). Die erste Phase ist zuständig für einen logischen Zylinderindex von $i = 0$ bis $i = 179$, wie aus der Tabelle unter „logic Cyl. idx. i“ ersichtlich. Dies entspricht den ersten 20% der

Festplattenkapazität. Es entsteht keine Write-Amplifikation bei verteilten Schreibzugriffen oder beim Befüllen.

[0161] Fig. 16 zeigt die zweite Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 180$ bis $i = 359$ zuständig ist bzw. für einen Füllstand von 20% bis 40%. Pro Band **21** werden die nach innen benachbarten Spuren **3** belegt, beispielsweise durch Schreiben je einer Datenspur **20** auf die Zylinderpaare (001, 002) und (008, 009).

[0162] Aus der Belegung der Bänder **21** in Fig. 16 ist ersichtlich, dass beim Hinzufügen neuer Daten sowie bei Änderungen an den letzten 20% der neu hinzugefügten Daten keine Write-Amplifikation entsteht. Dies gilt bei jedem Füllstand. Beispielsweise können auch bei einem Füllstand von 30% die letzten 20% der neu hinzugefügten Daten, d. h. auch Daten, die aus der ersten Phase stammen, ohne Read-Modify-Write geändert werden. Dies lässt sich damit begründen, dass es in jedem Zustand genau zwei Spuren **3** pro Band **21** gibt, mithin 20% der Spuren **3**, welche sich direkt und jederzeit überschreiben lassen. Nur bei Änderungen an älteren Daten, in diesem Beispiel an den ersten 10% des Adressbereichs der Sektoren **6**, kann ein Read-Modify-Write erforderlich sein.

[0163] Die dritte und vierte Phase sind nicht als Zeichnung dargestellt. In der Vorgehensweise entsprechen sie der zweiten Phase aus Fig. 16. Die dritte Phase ist zuständig für einen logischen Zylinderindex von $i = 360$ bis $i = 539$ und die vierte Phase von $i = 540$ bis $i = 719$. (Dies lässt sich mittels Fig. 17 nachvollziehen.) Pro Band **21** werden jeweils die nächsten nach innen benachbarten Spuren **3** mit Sektordaten belegt, in der dritten Phase beispielsweise durch Beschreiben der Zylinderpaare (002, 003) und (007, 008). Beim Hinzufügen neuer Daten sowie bei Änderungen an den letzten 20% der neu hinzugefügten Daten entsteht auch hier keine Write-Amplifikation.

[0164] Fig. 17 zeigt die Spuren **3** der vollständig belegten Plattenoberfläche **2** am Ende der fünften und letzten Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 720$ bis $i = 899$ zuständig ist. Ergänzt werden die zur Distanzspur **14** benachbarten Spuren **3**, beispielsweise durch Beschreiben der Zylinderpaare (004, 005) und (005, 006) im 1. Band.

[0165] In der vierten Ausführungsform können Änderungen an den letzten 20% der neu hinzugefügten Daten grundsätzlich ohne Write-Amplifikation ausgeführt werden, und zwar auch bei einer vollständig gefüllten SMR-Festplatte **1**.

[0166] Beim Vergleich der dritten und der vierten Ausführungsform wird der Fachmann erkennen, dass die verschiedenen Strategien, mit denen die Spuren **3** der Plattenoberflächen **2** beschrieben werden kön-

nen, unterschiedliche Vor- und Nachteile haben. Der Fachmann wird daher eine Ausführungsform oder eine Variante wählen, welche für einen konkreten Einsatzzweck besonders geeignet ist.

[0167] Beispielsweise zeichnet sich die dritte Ausführungsform dadurch aus, dass bis zu einem Füllstand von 60% keinerlei Write-Amplification entsteht, insbesondere auch nicht bei verteilten Schreibzugriffen. Als Einsatzszenario wäre daher eine Datenbank denkbar, welche nur langsam in der Größe wächst und deren Inhalt häufig geändert wird.

[0168] Die vierte Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass bei neu hinzugefügten Daten grundsätzlich keine Write-Amplification auftritt. Auch bei verteilten Schreibzugriffen auf die zuletzt ergänzten Daten entsteht keine Write-Amplification. Als Einsatzszenario wäre daher ein Server-System zum Editieren von großen Video-Dateien denkbar, welches neue Filmdaten ohne Write-Amplification speichern kann und welches insbesondere nach dem Editieren oder Umrechnen dieser Filmdaten auf dem frei gewordenen Speicherplatz der alten und gelöschten Fassung eine neue Fassung (oder andere Daten) ohne Write-Amplification speichern kann.

[0169] Ein weiteres Beispiel für ein mögliches Einsatzszenario der vierten Ausführungsform ist ein Dienst, welcher im Internet Fotos und Videos von Endanwendern speichert, beispielsweise ein Online-Fotoalbum oder ein Soziales Netzwerk. In der Regel werden neue Fotos und Videos vom Anwender häufiger geändert (Größe, Orientierung, Effekt-Filter) oder entfernt als alte Fotos und Videos. Sobald ein Foto oder ein Video auf dem Server des Online-Dienstes gelöscht wurde, kann der frei gewordene Speicherplatz ohne Write-Amplification für eine neue Fassung genutzt werden oder auch für andere Daten.

Fünfte Ausführungsform

[0170] Fig. 18, Fig. 19 und Fig. 20 zeigen eine fünfte Ausführungsform. Das Verhältnis der Spurbreite **19** des Leselements **17** zur Spurbreite des Schreibelements **16** beträgt nunmehr 1 zu 3. Dies ist aus dem in Fig. 18 dargestellten Schreiblesekopf **8** ersichtlich. Die Überbreite **18** des Schreibelements **16** ist in dieser Patentschrift immer als Differenz aus der gesamten Spurbreite des Schreibelements **16** und der Spurbreite **19** des Leselements **17** definiert. Dementsprechend ergibt sich die Überbreite **18** aus der Summe der rechts und links überstehenden Teilbereiche des Schreibelements **16**, die in Fig. 18 mit Pfeilen bemaßt sind.

[0171] Das Schreibelement **16** schreibt eine Daten-spur **20** mit dreifacher Spurbreite **19**. Dementsprechend wird ein Distanzbereich **14** benötigt, der mindestens die Breite von zwei Spuren **3** einnimmt, mit-

hin die doppelte Spurbreite **19**. Es werden symmetrische Bänder **21** mit einem Distanzbereich **14** in der Mitte verwendet. Pro Band **21** können acht Spuren **3** zum Speichern von Daten verwendet werden. Auf einer Plattenoberfläche **2** befinden sich 990 Spuren, gezählt von Zylinder 000 bis Zylinder 989, die in diesem Fall zu 99 Bändern gruppiert sind. 80% der Plattenoberfläche **2** werden zum Speichern von Daten genutzt, 20% sind für die Distanzbereiche **14** reserviert.

[0172] Die fünfte Ausführungsform verwendet zum Beschreiben der Spuren **3** eine Strategie vergleichbar zur dritten Ausführungsform und ist somit beispielsweise für Datenbanken geeignet, deren Inhalt häufig geändert wird. Zu diesem Zweck wird der Adressbereich der Sektoren **6** (von Null bis A) von der Funktion $f(g(a))$ in drei Adressteilbereiche aufgeteilt, und zwar in die Intervalle von Null bis 0.5 A, 0.5 A bis 0.75 A und 0.75 A bis A. Dementsprechend erfolgt das Befüllen einer leeren SMR-Festplatte **1**, idealisiert betrachtet, in drei Phasen.

[0173] Fig. 18 zeigt das Ende der ersten Phase, welche bei einem logischen Zylinderindex von $i = 395$ erreicht ist, beziehungsweise sobald 50% jeder Plattenoberfläche **2** beschrieben ist. Mithin ist pro Band **21** von den acht verfügbaren Spuren **3** eine Teilauswahl von vier Spuren **3** belegt. Belegte Spuren **3** sind in der Tabellenspalte „Belegt“ mit einer „1“ vermerkt. Die Überbreite **18** des Schreibelements **16** wird durch die unbelegten Nachbarspuren oder den Distanzbereich **14** aufgefangen. Mit Ausnahme des Distanzbereichs **14** gibt es keine überlappenden Datenspuren **20**. Bei verteilten Schreibzugriffen auf bereits belegte Teile der SMR-Festplatte **1** entsteht keine Write-Amplification, womit bis zu diesem Füllstand in etwa die Performance einer konventionellen Festplatte erreicht werden kann.

[0174] Fig. 19 zeigt die zweite Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 396$ bis $i = 593$ zuständig ist bzw. einen Füllstand von 50% bis 75%. Basierend auf der Umrechnung durch die Index-Funktion $f(i)$ werden beispielsweise im 1. Band Sektordaten auf Zylinder 002 und 007 ergänzt. Hierzu wird mit dem breiten Schreibelement **16** auf die Zylindertripel (002, 003, 004) und (005, 006, 007) geschrieben. Die bereits belegten Spuren **3** auf Zylinder 003 und 006 werden dabei überschrieben, womit ein Read-Modify-Write erforderlich ist. Da diese Write-Amplification lediglich das Beschreiben einer einzelnen, zusätzlichen Spur **3** erfordert, ist bis zu einem Füllstand von 75% eine gute Performance bei verteilten Schreibzugriffen zu erreichen.

[0175] Fig. 20 zeigt die Spuren **3** der vollständig belegten Plattenoberfläche **2** am Ende der dritten Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 594$ bis $i = 791$ zuständig ist. Ergänzt werden die je-

weils letzten freien Spuren **3** pro Band **21**, beispielsweise auf Zylinder 001 und 008 im 1. Band. Hierbei entsteht eine erhöhte Write-Amplification, die das Beschreiben von zwei zusätzlichen Spuren **3** erfordert, womit die letzten 25% der Speicherkapazität eine Kapazitätsreserve darstellen, die mit reduzierter aber brauchbarer Performance läuft.

Sechste Ausführungsform

[0176] Die sechste Ausführungsform gemäß **Fig. 21** verwendet zum Beschreiben der Spuren **3** eine Strategie vergleichbar zur vierten Ausführungsform. Somit tritt bei neu hinzugefügten Daten sowie bei verteilten Schreibzugriffen auf die zuletzt ergänzten Daten grundsätzlich keine Write-Amplification auf. Im Gegensatz zu allen bisherigen Ausführungsformen wird jedoch kein symmetrisches Band **21**, **22** verwendet, sondern ein konventionelles Band **15** gemäß **Fig. 4**, bei dem die Überlappungen der Datenspuren **20** nur in einer Richtung erfolgt, beispielsweise von oben nach unten.

[0177] Das Verhältnis der Spurbreite **19** des Leseelements **17** zur Spurbreite des Schreibelements **16** beträgt in diesem Beispiel 1 zu 3. Die Distanzbereiche **14** belegen somit die doppelte Spurbreite **19**. Pro Band **15** können sechs Spuren **3** zum Speichern von Daten verwendet werden. Auf einer Plattenoberfläche **2** befinden sich in diesem Fall 992 Spuren, gezählt von Zylinder 000 bis Zylinder 991 und gruppiert in 124 Bändern.

[0178] Der Adressbereich der Sektoren **6** (von Null bis A) wird von der Funktion $f(g(a))$ in sechs gleich große Adressteilbereiche aufgeteilt, und zwar in die Intervalle von Null bis A/6, A/6 bis 2A/6, 2A/6 bis 3A/6, 3A/6 bis 4A/6, 4A/6 bis 5A/6 und 5A/6 bis A. Das Befüllen einer leeren SMR-Festplatte **1** erfolgt im wesentlichen in sechs Phasen, wobei in dieser Ausführungsform pro Phase nur eine Spur **3** pro Band **15** ergänzt wird.

[0179] **Fig. 21** zeigt den Zustand einer vollständig belegten Plattenoberfläche **2** am Ende der sechsten und letzten Phase. Die Phasen eins bis fünf können anhand der Tabellenspalte „logic Cyl. idx. i“ nachvollzogen werden. Demnach erfolgt das Befüllen der einzelnen Bänder **15** von oben nach unten. Bezogen auf das 1. Band wird beispielsweise in der ersten Phase zunächst nur Zylinder 000 belegt, in der zweiten Phase dann Zylinder 001, in der dritten Phase Zylinder 003 usw.

[0180] Entsprechend der Aufteilung in Adressteilbereiche ist die erste Phase für einen logischen Zylinderindex von $i = 0$ bis $i = 123$ zuständig, die zweite Phase von $i = 124$ bis $i = 247$, die dritte Phase von $i = 248$ bis $i = 371$, die vierte Phase von $i = 372$ bis $i = 495$, die fünfte Phase von $i = 496$ bis $i = 619$ und

schlussendlich die sechste Phase von $i = 620$ bis $i = 743$.

Siebte Ausführungsform

[0181] Die siebte Ausführungsform gemäß **Fig. 22** und **Fig. 23** verwendet zum Beschreiben der Spuren **3** eine Strategie vergleichbar zur dritten Ausführungsform und ist somit optimiert für gespeicherte Daten, die häufig geändert werden. Das Verhältnis der Spurbreite **19** des Leseelements **17** zur Spurbreite des Schreibelements **16** beträgt 1 zu 3 und der Distanzbereich **14** belegt zwei Spuren **3**. Pro Band **15** können fünf Spuren **3** zum Speichern von Daten verwendet werden, und die Spuren **3** auf den Plattenoberflächen **2** sind in 142 Bändern gruppiert.

[0182] Im wesentlichen wird ein konventionelles Band **15** gemäß **Fig. 4** verwendet, bei dem die Überlappungen der Datenspuren **20** nur nach unten erfolgt, mit der Ausnahme, dass beim Schreiben der obersten Spur **3** eines jeden Bandes **15** das breite Schreibelement **16** so positioniert wird, dass der obere, benachbarte Distanzbereich **14** mit genutzt wird und nach unten keine Überlappung entsteht. Siehe die Datenspuren **20** in **Fig. 22**.

[0183] Dieses Vorgehen ermöglicht es, dem ersten Adressteilbereich eine Teilauswahl von drei Spuren **3** pro Band **15** zuzuordnen, mithin die ersten 60% der Festplattenkapazität, ohne dass es in der ersten Phase zu überlappenden Datenspuren **20** kommt (mit Ausnahme des Distanzbereichs **14**). Solange der Füllstand der SMR-Festplatte **1** unter 60% liegt, entsteht auch bei verteilten Schreibzugriffen auf den belegten Teil der Plattenoberfläche **2** keine Write-Amplification. Die durch den ersten Adressteilbereich belegten Spuren **3** können in **Fig. 22** der Tabellenspalte „Belegt“ entnommen werden.

[0184] Die siebte Ausführungsform verwendet drei Adressteilbereiche bzw. drei Phasen. **Fig. 23** zeigt den Zustand der vollständig belegten Plattenoberfläche **2** am Ende der dritten Phase. Die Phasen können anhand der Tabellenspalte „logic Cyl. idx. i“ nachvollzogen werden. Bezogen auf das 1. Band wird beispielsweise in der ersten Phase zunächst Zylinder 000, Zylinder 001 und Zylinder 004 belegt. In der zweiten Phase wird dann zusätzlich Zylinder 003 belegt und in der dritten Phase wird schlussendlich Zylinder 002 belegt.

Optionale Ausführungsformen

[0185] **Fig. 24** zeigt einen Balken, der die Adressteilbereiche **40** und die Phasen einer SMR-Festplatte **1** gemäß der ersten Ausführungsform visualisiert. Die Zahlenachse „LBA“ unterhalb des Balkens bildet den verfügbaren Adressbereich ab, und zwar von der niedrigsten Sektoradresse „0“ bis zur höchsten Sek-

toradresse „A“, wobei die SMR-Festplatte **1** insgesamt über eine Kapazität von A Sektoren **6** verfügt.

[0186] Gemäß der Beschreibung zur ersten Ausführungsform und gemäß der Formel $c = f(g(a))$ erfolgt der Wechsel zwischen der ersten Phase und der zweiten Phase in der Mitte des Adressbereichs bei A/2, mithin bei einem Füllstand von 50%. Dies ist in **Fig. 24** durch die Unterteilung des Balkens in zwei Adressteilbereiche **40** mit und ohne Punktmuster dargestellt.

[0187] In **Fig. 24** ist am Anfang des Adressbereichs eine Dateiverwaltungstabelle **41** für ein Dateisystem untergebracht. Bei der Dateiverwaltungstabelle **41** kann es sich auch um ein Inhaltsverzeichnis oder um andere Index- oder Verwaltungsdaten handeln, die im Betrieb oft geändert werden. Bis zu einem Füllstand von 50%, d. h. solange nur die äußeren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** beschrieben sind, kann in der ersten Ausführungsform die Dateiverwaltungstabelle **41** ohne Write-Amplification aktualisiert werden. Oberhalb von 50%, in der zweiten Phase, entsteht eine Write-Amplification, da nunmehr die inneren Spuren **3** eines jeden Bandes **21** beschrieben werden.

[0188] Um zu erreichen, dass es bei Änderungen in der Dateiverwaltungstabelle **41** auch bei einem Füllstand oberhalb von 50% zu keiner Write-Amplification kommt, kann gemäß der optionalen Ausführungsform aus **Fig. 25** ein optimierter Teilbereich **42** vom Festplattencontroller **10** virtuell verschoben werden („remapping“). Der optimierte Teilbereich **42** hat gemäß **Fig. 25** eine Größe von q Sektoren **6** bzw. umfasst eine Anzahl von q LBA-Nummern. Die Größe q ist so gewählt, dass die Dateiverwaltungstabelle **41** vollständig hineinpasst. Der optimierte Teilbereich **42** kann aber auch größer (oder ggf. kleiner) gewählt werden, z. B. falls die genaue Größe der Dateiverwaltungstabelle **41** nicht bekannt ist.

[0189] Gemäß **Fig. 25** wird der Adressbereich am Ende der zweiten Phase, also bei hohen LBA-Nummern, die bei einem Füllstand nahe 100% zum Einsatz kommen, virtuell an den Anfang der Logical Block Adressierung verschoben. Dieses Remapping ist in **Fig. 25** durch den Pfeil **43** dargestellt und wird durch eine Funktion $h(a)$ ausgedrückt, wobei a eine LBA-Nummer ist. Somit ergibt sich die neue Gesamtformel:

$$c = f(g(h(a)))$$

[0190] Durch das Remapping wird der zweite Adressteilbereich **40** bzw. die zweite Phase in zwei Teile aufgeteilt: In einen optimierten Teilbereich **42** für die Dateiverwaltungstabelle **41** und in einen regulären Bereich, welcher nunmehr um q Sektoren **6** kleiner ist. Hierdurch wird erreicht, dass die Dateiverwaltungstabelle **41** auf Spuren **3** gespeichert wird,

die normalerweise erst sehr spät zum Einsatz kommen, wenn die SMR-Festplatte **1** weitestgehend gefüllt ist. Gemäß **Fig. 25** befindet sich der optimierte Teilbereich **42** zwischen der Sektoradresse A-q und der Sektoradresse A. Erst im Anschluss beginnt mit der Sektoradresse „0“ der reguläre erste Adressteilbereich **40**.

[0191] Durch das Remapping mit $h(a)$ und durch die Verwendung von Spuren **3**, die regulär erst sehr spät in der zweiten Phase zum Einsatz kommen, werden alle Daten (oder die Mehrzahl der Daten), die zur Dateiverwaltungstabelle **41** gehören, auf den inneren Spuren **3** der Bänder **21** gespeichert. Dies wird in **Fig. 26** verdeutlicht, welche exemplarisch die letzten zwei Bänder **21** (198. Band und 199. Band) der letzten Plattenoberfläche **2** im Plattenstapel **13** darstellt, wobei sich auf den Spuren **3** der Zylinder 986, 988, 991 und 993 Sektordaten befinden, die zu der Dateiverwaltungstabelle **41** gehören. Durch die Nachbarschaft der inneren Spuren **3** zur Distanzspur **14** ist ein Überschreiben jederzeit ohne Read-Modify-Write möglich, und somit können Änderungen an der Dateiverwaltungstabelle **41** ohne Write-Amplification erfolgen.

[0192] Bei einer weitestgehend gefüllten SMR-Festplatte **1** werden zum Schluss Daten auf Bänder **21** geschrieben, deren innere Spuren **3** bereits mit der Dateiverwaltungstabelle **41** belegt sind. Hierdurch entsteht eine geringfügige, zusätzliche Write-Amplification, da die Daten von der Dateiverwaltungstabelle **41** per Read-Modify-Write neu geschrieben werden müssen, um die äußeren Spuren **3** zu belegen. Mithin wird die auf Performance optimierte Dateiverwaltungstabelle **41** erkaufte durch eine geringe Einbuße in der Schreibleistung, sobald die SMR-Festplatte **1** nahezu voll ist. Der Fachmann wird, je nach Einsatzszenario, entscheiden können, welche Ausführungsform vorteilhaft ist.

[0193] Auch in anderen Ausführungsformen ist ein Remapping der Dateiverwaltungstabelle **41** mittels einer geeigneten Funktion $h(a)$ möglich. Beispielsweise kann in der vierten Ausführungsform ein optimierter Teilbereich **42** aus der fünften und letzten Phase (oder die gesamte fünfte Phase) auf die Position der Dateiverwaltungstabelle **41** verschoben werden.

[0194] Die Dateiverwaltungstabelle **41**, beispielsweise MFT, muss sich nicht notwendigerweise am Anfang der Festplatte befinden (bei niedrigen LBA-Nummern, wie in **Fig. 24** und **Fig. 25** dargestellt), sondern kann sich auch in der Mitte des Adressbereichs befinden. Betrachtet wird beispielsweise die vierte Ausführungsform: Durch ein Speichern der Dateiverwaltungstabelle **41** auf Spuren **3**, die dem fünften Adressteilbereichs **40** zugeordnet sind, wird erreicht, dass Spuren **3** zum Einsatz kommen, die in direkter

Nachbarschaft zu den Distanzspuren **14** liegen, wodurch bei Änderungen in der Dateiverwaltungstabelle **41** keine Write-Amplifikation entsteht.

[0195] Fig. 27 zeigt die drei Adressteilbereiche **40** und Phasen einer SMR-Festplatte **1** in der dritten Ausführungsform. Gemäß der Funktion $f(g(a))$ erfolgt der Wechsel zwischen den Phasen bei 0.6 A (Füllstand: 60%) und bei 0.8 A (Füllstand: 80%), wobei A die höchste Sektoradresse auf der SMR-Festplatte **1** ist. In diesem Beispiel wird vom Dateisystem eine Dateiverwaltungstabelle **41** verwaltet, welche sich in der Mitte der Festplatte, mithin bei 0.5 A befindet. Da sich die Dateiverwaltungstabelle **41** vollständig im ersten Adressteilbereiche **40** befindet, d. h. unterhalb eines Füllstands von 60%, und da in der ersten Phase alle Schreibzugriffe ohne Read-Modify-Write möglich sind, können Änderungen an der Dateiverwaltungstabelle **41** ohne Write-Amplifikation erfolgen.

[0196] Bei einem Füllstand von mehr als 60% ist jedoch auch die Dateiverwaltungstabelle **41** in zunehmendem Maße von einer Write-Amplifikation betroffen. Um dies zu vermeiden und um zu erreichen, dass Änderungen in der Dateiverwaltungstabelle **41** durchgängig bis hin zu einer vollständig gefüllten SMR-Festplatte **1** ohne Read-Modify-Write möglich sind, kann die dritte Ausführungsform optional modifiziert werden: Dies ist in Fig. 28, Fig. 29 und Fig. 30 dargestellt.

[0197] Die modifizierte dritte Ausführungsform verwendet anstelle der drei Adressteilbereiche **40** nunmehr vier Adressteilbereiche **40**. Fig. 28 zeigt die erste Phase, welche für einen logischen Zylinderindex von $i = 0$ bis $i = 359$ zuständig ist, mithin bis zu einem Füllstand von 40%. Im Gegensatz zur ursprünglichen dritten Ausführungsform wird nur eine Teilauswahl von vier Spuren **3** pro Band **21** beschrieben. Die beiden innersten Spuren **3**, welche zur Distanzspur **14** benachbart sind, werden für einen neuen, optimierten Teilbereich **42** aufgespart, in dessen Zuständigkeitsbereich die Dateiverwaltungstabelle **41** fällt. Dies ist in Fig. 29 dargestellt: Die Dateiverwaltungstabelle **41** befindet sich im optimierten Teilbereich **42** der zweiten Phase zwischen 0.4 A und 0.6 A bzw. einem Füllstand von 40% und 60%.

[0198] Fig. 30 zeigt das Ende der zweiten Phase für den neu hinzugefügten optimierten Teilbereich **42**, welcher für einen logischen Zylinderindex von $i = 360$ bis $i = 539$ zuständig ist. Pro Band **21** werden zwei Spuren **3** ergänzt, und zwar die zuvor aufgesparten innersten Spuren **3**, beispielsweise die Spuren **3** auf Zylinder 004 und Zylinder 006 im 11. Band. Da es in der zweiten Phase nach wie vor keine überlappenden Sektordaten gibt (Ausnahme: Distanzspur **14**), entsteht keine Write-Amplifikation.

[0199] Die letzten beiden Phasen (dritte und vierte) für einen Füllstand von 60% bis 80%, respektive 80% bis 100%, entsprechen den letzten beiden Phasen (zweite und dritte) der ursprünglichen dritten Ausführungsform gemäß Fig. 13 und Fig. 14. Pro Band **21** werden die restlichen freien Spuren **3** gefüllt und zwar in der dritten Phase zunächst die freien Spuren **3** weiter innen (z. B. Zylinder 003 und Zylinder 007 im 1. Band) und dann in der vierten Phase die freien Spuren **3** weiter außen (z. B. Zylinder 001 und Zylinder 009 im 1. Band).

[0200] Durchgängig durch alle Phasen sind Änderungen im optimierten Teilbereich **42** und mithin in der Dateiverwaltungstabelle **41** jederzeit ohne Read-Modify-Write möglich, da sich die zugehörigen Daten auf Spuren **3** neben der Distanzspur **14** befinden. Diese Vorgehensweise ist auch bei den anderen Ausführungsformen möglich, sowie bei weiteren Ausführungsformen; beispielsweise auch bei Ausführungsformen, bei denen die Spurbreite des Schreibelements **16** das dreifache der Spurbreite **19** des Leseelements **17** beträgt, wie u. a. in Fig. 18 dargestellt.

[0201] Es ist auch möglich, durch weiteres Unterteilen der Adressteilbereiche **40** dafür zu sorgen, dass sowohl am Anfang der SMR-Festplatte **1** (niedrige LBA-Nummern) als auch in der Mitte der SMR-Festplatte **1** (LBA-Nummern bei 0.5 A) mehrere für Dateiverwaltungstabellen **41** optimierte Teilbereiche **42** eingerichtet werden, so dass die SMR-Festplatte **1** unterschiedlich strukturierte Dateisysteme gleichermaßen optimal unterstützt. Selbstverständlich lassen sich derart optimierte Teilbereiche **42** auch an anderer Stelle anlegen, z. B. um eine spezielle Index-Verwaltung einer Datenbank zu beschleunigen.

Achte Ausführungsform

[0202] Fig. 31 zeigt eine achte Ausführungsform. Auf der Plattenoberfläche **2** sind Spuren **3** und Distanzbereiche **14** im direkten Wechsel angeordnet. Für die Spuren **3** wird die reguläre Spurbreite **19** verwendet. Die Breite der Distanzbereiche **14** beträgt die doppelte Spurbreite **19**. Es wird ein Schreiblesekopf **8** verwendet, dessen Schreibelement **16** Daten Spuren **20** schreibt, deren Breite bis zum fünffachen der Spurbreite **19** des Leseelements **17** beträgt. Mithin verfügt das Schreibelement **16** über eine gesamte Überbreite **18** von vier Spurbreiten **19**, welche gemäß Fig. 31 zu gleichen Teilen rechts und links vom Leselement **17** übersteht.

[0203] In anderen Ausführungsformen kann das Größenverhältnis der Spurbreite des Schreibelements **16** zum Leseelement **17** beispielsweise auch 3:1, 7:1 oder 7:2 betragen. Die Breite der Distanzbereiche **14** ist entsprechend anzupassen. So wird für die genannten Beispiele mindestens eine Breite benötigt, die einer einfachen Spurbreite **19**, einer dreifa-

chen Spurbreite **19** oder einer 1.25-fachen Spurbreite **19** entspricht.

[0204] Beim Schreiben von Sektordaten auf eine Spur **3** der Plattenoberfläche **2** mittels des breiten Schreibelements **16** werden die benachbarten Distanzbereiche **14** beidseitig genutzt, um die Überbreite **18** der Datenspur **20** aufzufangen: Jeweils die Hälfte der Überbreite **18** des Schreibelements **16** kommt auf den Distanzbereichen **14** zu liegen.

[0205] Da die Distanzbereiche **14** gleichermaßen von beiden Seiten genutzt werden, erhöht sich die tatsächliche Spurdichte auf der Plattenoberfläche **2**. Legt man die in **Fig. 31** definierte Spurbreite **19** als Maßeinheit zugrunde, sowie die gegebene Breite des Schreibelements **16**, so beträgt der benötigte Spurabstand bei einer konventionellen Festplatte die fünffache Spurbreite **19**. Durch die beidseitigen Überlappungen der Datenspuren **20** benötigt die achte Ausführungsform hingegen lediglich einen effektiven Spurabstand vom dreifachen der Spurbreite **19**. Gegenüber einer konventionellen Festplatte erhöht sich die Kapazität der Plattenoberfläche **2** mithin um 66.6%.

[0206] Die achte Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass die Sektordaten auf allen Spuren **3** der Plattenoberfläche **2** jederzeit und bei jedem Füllstand ohne Write-Amplification geändert werden können, und zwar auch im bereits belegten Teil der Plattenoberfläche **2**. Dies wird anhand des Beispiels in **Fig. 31** erläutert.

[0207] Das als „aktiv“ gekennzeichnete Schreibelement **16** schreibt in **Fig. 31** eine Datenspur **20** auf die Zylinder 021 bis 025, wodurch die Spur **3** des Zylinders 023 mit Sektordaten gefüllt wird. Wenn zu einem späteren Zeitpunkt der in **Fig. 31** mit Phantomlinien umrandete Schreiblesekopf **8** die noch leere Spur **3** auf Zylinder 020 mit Sektordaten füllt, so ist das Schreibelement **16** zu diesem Zeitpunkt über den Zylindern 018 bis 022 positioniert. Die somit geschriebene Datenspur **20** überschreibt je einen Teil von zuvor geschriebenen Datenspuren **20**, und zwar die Datenspur **20** auf Zylinder 015 bis 019 und die Datenspur **20** auf Zylinder 021 bis 025. Es wird jedoch nur der Teil dieser Datenspuren **20** überschrieben, der auf den Distanzbereichen **14** liegt. Die „offiziellen“ Positionen der benachbarten Sektordaten befinden sich auf Zylinder 017 und Zylinder 023 und werden dort nicht überschrieben, so dass sie vom schmalen Leseelement **17** nach wie vor ausgelesen werden können.

[0208] Die freie Spur **3** auf Zylinder 011, sowie alle bereits belegten Spuren **3**, können auf die gleiche Weise überschrieben werden, ohne dass ein Read-Modify-Write nötig ist. Die achte Ausführungsform hat somit bei verteilten Schreibzugriffen die selben gün-

tigen Eigenschaften wie eine konventionelle Festplatte und es entsteht grundsätzlich keine Write-Amplification.

[0209] Optional, wenn alle Spuren **3** in der achten Ausführungsform belegt sind, kann in einer zweiten Phase damit begonnen werden, die vorhandenen Distanzbereiche **14** als Reserve oder als erweiterte Kapazität zu beschreiben. Hierzu wird die Plattenoberfläche **2** von vornherein so vorbereitet, dass die im Wechsel angeordneten Spuren **3** und Distanzbereiche **14** zu größeren Bändern zusammengefasst sind, welche durch einen breiteren Distanzbereich **14** voneinander getrennt sind. Im Beispiel gemäß **Fig. 31** muss dieser größere Distanzbereich mindestens die vierfache Spurbreite **19** umfassen und könnte sich auf Zylinder 024, 025, 026 und 027 befinden, womit die Zylinder von 002 bis 023 das 1. Band bilden.

[0210] Zur Umstellung auf die zweite Phase werden alle Daten eines Bandes ausgelesen, gepuffert und anschließend in einer platzsparenden „Shingle“-Technik, ohne zusätzliche Distanzbereiche **14**, mit überlappenden Datenspuren **20** zurückgeschrieben, beispielsweise als konventionelles Band **15** oder als symmetrisches Band **21**, **22**. Ab diesem Zeitpunkt entsteht Write-Amplification, womit sich die SMR-Festplatte **1** im Reservebetrieb befindet.

Neunte Ausführungsform

[0211] Beim Schreiben einer Datenspur **20** mit dem breiten Schreibelement **16** wird neben der eigentlichen Spur **3** auch eine Nachbarspur (oder je nach Überbreite **18** mehrere Nachbarspuren) beschrieben, welche als systemimmanente Backup-Spuren genutzt werden können. Wenn beim Lesen ein Sektor **6** defekt ist (z. B. ein CRC-Fehler) oder schlecht lesbar ist (mehrere Leseversuche, kritische Fehlerkorrektur), kann geprüft werden, ob sich auf der Nachbarspur (oder einer der Nachbarspuren) eine besser lesbare Kopie befindet. Die Verfügbarkeit dieser Sicherheitskopie hängt vom Füllstand der SMR-Festplatte **1** ab, beziehungsweise von der konkreten Belegung des jeweiligen Bandes. Dieses Konzept wird anhand einer neunten Ausführungsform dargelegt, kann aber auch in anderen Ausführungsformen umgesetzt werden, beispielsweise in der fünften Ausführungsform, bei der die effektive Spurbreite des Schreibelements **16** drei mal so breit ist wie die Spurbreite **19** des Leselements **17**.

[0212] Die neunte Ausführungsform gemäß **Fig. 32** entspricht weitestgehend der ersten Ausführungsform, mit dem Unterschied, dass zusätzlich zum Flag „Belegt“ Informationen über die Konfiguration („Config.“) der Bänder **21** sowie Informationen über die Verwendung („Status“) der einzelnen Sektoren **6** auf den Spuren **3** verwaltet werden.

[02113] Für „Config.“ und „Status“ wird eine lokale Index-Nummerierung der Spuren **3** eines jeden Bandes **21** eingeführt. Dazu werden die fünf Spuren **3** pro Band **21** von „0“ bis „4“ durchnummeriert, einschließlich der Distanzspur **14**. Die lokale Index-Nummer ist in **Fig. 32** und in den nachfolgenden Figuren in Klammern hinter der Zylinder Nummer „phys. Cyl. c“ angegeben. Beispielsweise bedeutet „009 (4)“, dass die Spur des Zylinders 009 die lokale Index-Nummer „4“ hat.

[02114] Die Einträge unter „Config.“ stellen ein Spurpaar dar, welches angibt, auf welchen benachbarten Spuren **3** das Schreibelement **16** mit seiner Überbreite **18** schreiben soll. Die einzelnen Werte dieses Spurpaars werden als lokale Index-Nummer ausgedrückt, mithin mit Werten zwischen „0“ und „4“, für Zylinder 008 beispielsweise (3, 2). Der erste Wert des Zahlenpaars repräsentiert die Spur **3**, aus der der Sektor **6** später mit dem Leselement **17** ausgelesen werden soll, also die offizielle Position der Daten. Der zweite Wert des Zahlenpaars definiert die Spur **3**, welche die Überbreite **18** des Schreibelements **16** auffängt. Dieser zweite Wert ist immer um Eins größer oder kleiner als der erste Wert. Im Ausgangszustand ist der erste Wert des Zahlenpaars unter „Config.“ identisch mit der lokalen Index-Nummer des Sektors **6**.

[02115] Der Eintrag unter „Status“ gibt an, welcher Spur **3** die geschriebenen Daten zugeordnet sind. Die Einträge protokollieren die Schreibtätigkeit des breiten Schreibelements **16**. Beispielsweise enthalten in **Fig. 32** die beiden Sektoren **6** auf den Spuren **3** des Zylinderpaars (008, 009) beide den Status „4“, was bedeutet, dass es sich um Daten handelt, die der Spur **3** mit der lokalen Index-Nummer „4“ zugeordnet sind, siehe die Zahl in Klammern hinter der Zylinder Nummer: „009 (4)“. Die beiden untereinander stehenden Einträge (4|4) unter „Status“ sind beim letzten Schreibvorgang des breiten Schreibelements **16** in der Tabelle eingetragen worden. Dass der Sektor **6** auf Zylinder „008 (3)“ den Status „4“ hat, bedeutet, dass dieser Sektor **6** zur Zeit die selben Daten enthält wie der Sektor **6** auf Zylinder „009 (4)“.

[02116] Der Status-Wert „4“ des Sektors **6** auf Zylinder „008 (3)“ bedeutet des weiteren, dass hier zur Zeit keine eigenen Daten abgelegt sind. Würde dieser Sektor **6** eigene Daten enthalten, so wäre der Status auf „3“ gesetzt, also auf den Wert der lokalen Index-Nummer dieser Spur **3**.

[02117] **Fig. 32** zeigt exemplarisch unterschiedlich stark belegte Bänder **21** mit diversen defekten Sektoren **44**, deren Lesefehler sich alle durch einen Backup-Spurabschnitt **45** abfangen lassen: Beispielsweise hat die Spur **3** auf Zylinder 000 einen CRC-Fehler oder einen anderen Defekt, der sich nicht mit Hilfe von Fehlerkorrektur-Informationen beheben lässt.

In der Spalte „Status“ zeigen die zwei untereinander stehenden Einträge mit identischem Zahlenwert (0|0) an, dass die nach innen benachbarte Spur **3** auf Zylinder 001 die gleichen Daten enthält und folglich als Backup ausgelesen werden kann. Eine CRC-Fehlermeldung oder eine andere Fehlermeldung an das Betriebssystem kann vermieden werden und die Daten sind nicht verloren.

[02118] Die Datenrettung der übrigen in **Fig. 32** eingezeichneten defekten Sektoren **44** („Fehler“) erfolgt analog:

Das 1. Band ist zur Hälfte belegt und für beide äußeren Spuren **3** (lokale Index-Nummer 0 und 4) gibt es ein Backup. Das 2. Band ist zu dreiviertel belegt, und es gibt eine Backup-Option für die beiden Spuren **3** mit den lokalen Index-Nummern 1 und 4, mithin für Zylinder „006 (1)“ und „009 (4)“. Das 3. Band ist ebenfalls zu dreiviertel belegt, und es gibt eine Backup-Option für die Spuren **3** auf Zylinder „010 (0)“ und „013 (3)“.

[02119] Bei einem vollständig belegten Band **21** gibt es nur eine Spur **3**, für welche ein Backup existiert: Gemäß **Fig. 32** ist das 199. Band vollständig belegt, und mit Zylinder „992 (2)“ gibt es eine Backup-Option für den defekten Sektor **44** auf der Spur **3** des Zylinders „993 (3)“ mit der lokalen Index-Nummer **3**, zu erkennen an den beiden übereinander stehenden Einträgen (3|3) unter „Status“.

[0220] Durch die Existenz der Backup-Spuren **45** lässt sich die Gesamtkapazität der SMR-Festplatte **1** erhöhen, indem vorhandene Spielräume bei der Fehlertoleranz stärker ausgeschöpft werden: So lässt sich die Aufzeichnungsdichte auf den Plattenoberflächen **2** erhöhen, und die Fehlerkorrektur kann weniger umfassend implementiert werden, so dass sich der Platzbedarf für zusätzliche Fehlerkorrektur-Informationen reduziert. Die höhere Wahrscheinlichkeit, dass es nach dem Ausschöpfen dieser Fehlertoleranz-Reserven zu nicht mehr korrigierbaren Lesefehlern kommt, wird durch die häufige Existenz einer Backup-Spur **45** abgefangen.

[0221] In der neunten Ausführungsform wird, wie dargestellt, mittels der Tabelleneinträge unter „Status“ ermittelt, ob der Sektor **6** auf der Nachbarspur die gleichen Informationen enthält und somit als Backup zur Verfügung steht. In anderen Ausführungsformen kann stattdessen ein direkter Vergleich des Inhalts der benachbarten Spuren **3** erfolgen, wie nachfolgend beschrieben:

Sobald die unzureichend abgesicherten Daten eines defekten Sektors **44** eingelesen sind, werden in dieser Variante die Sektordaten auf der zuständigen Nachbarspur testhalber ebenfalls eingelesen. Je nach Ausführungsform können auch die Nachbarspuren auf beiden Seiten zum defekten Sektor **44** eingelesen werden oder weitere Spuren **3** in der Nä-

he. Die eingelesenen Daten der benachbarten Spur **3** bzw. Spuren **3** werden nun mit den Daten des defekten Sektors **44** auf Ähnlichkeit verglichen. Es lässt sich ein Schwellwert definieren, ab dem die unzureichend abgesicherten Daten des defekten Sektors **44** als identisch mit den Sektordaten einer benachbarten Spur **3** gelten. Basierend auf dem Ergebnis dieses Vergleichs, lässt sich ermitteln, ob auf einer der Nachbarspuren ein Backup verfügbar ist. Diese alternative Ausführungsform benötigt folglich keine „Status“-Spalte in der Tabelle, mit der die Schreibfähigkeit des breiten Schreibelements **16** protokolliert wird.

[0222] Wenn ein defekter Sektor **44** schlecht lesbar ist, wird er üblicherweise remappt, d. h. an einer anderen Stelle gespeichert. Hierfür ist ein Reservebereich (hot-fix-area) vorgesehen. Der Festplattencontroller **10** blendet den defekten Sektor **6** aus und blendet stattdessen einen Sektor **6** aus dem Reservebereich ein. Dieses Verfahren ist Stand der Technik.

[0223] In der neunten Ausführungsform kann hingegen dieser Reservebereich kleiner ausfallen oder ganz entfallen. Stattdessen werden innerhalb eines Bandes **21** defekte Sektoren **44** oder ganze Spuren **3** mit mindestens einem defekten Sektor **44** zur Distanzspur **14** oder zum Distanzbereich **14** umdekklariert. Der Anteil von 20% der Plattenoberfläche **2**, welcher beispielsweise in der neunten Ausführungsform für die Distanzspuren **14** benötigt wird, fungiert somit gleichzeitig als Reservebereich für defekte Sektoren **44** oder fehlerhafte Spuren **3**.

[0224] Als Ausgangssituation zeigt **Fig. 33** pro Band **21** einen defekten Sektor **44** (z. B. CRC-Fehler), welcher noch nicht „repariert“ ist: Die defekten Sektoren **44** befinden sich auf den Zylindernummern 001 (im 1. Band), 008 (im 2. Band), 014 (im 3. Band) und 990 (im 199. Band). Die hier beschriebene Methode zur „Reparatur“ defekter Sektoren **44** ist stets durchführbar, unabhängig davon, ob zum defekten Sektor **44** ein Backup-Spurabschnitt **45** existiert. Beispielsweise ist im Fall des 1. Bandes, des 2. Bandes und 3. Bandes je ein Backup-Spurabschnitt **45** verfügbar, während im 199. Band kein passender Backup-Spurabschnitt **45** vorhanden ist. Ungeachtet eines potentiellen Datenverlustes kann der defekte Sektor **44** im 199. Band „repariert“ werden.

[0225] **Fig. 34** zeigt rekonfigurierte Bänder, in denen die defekten Sektoren **44** „repariert“ sind. Die Reorganisation erfolgt durch die Einträge in den Konfigurations-Informationen („Config.“) der Bänder. Nach der Rekonfiguration befindet sich die Distanzspur **14** des jeweiligen Bandes genau auf der Spur **3** des defekten Sektors **44**. Der auf diesen Ersatz-Distanzspuren **14** geschriebene Inhalt wird im regulären Betrieb nicht benötigt, so dass die Schäden auf diesen Spuren **3** nicht ins Gewicht fallen.

[0226] Gemäß **Fig. 34** ist im 1. Band die Position der Distanzspur **14** von der intakten Spur **3** des Zylinders 002 auf den defekten Sektor **44** des Zylinders 001 verschoben worden. Dadurch steht dem 1. Band nunmehr mit dem Sektor **6** auf Zylinder 002 ein intakter Ersatz für den defekten Sektor **44** zur Verfügung. Die Anordnung der überlappenden Datenspuren **20** innerhalb des rekonfigurierten Bandes wird nun angepasst und neu in dieses Band geschrieben, so dass diesem Band weiterhin seine volle Spuranzahl (hier: vier) zur Verfügung steht. Damit der Festplattencontroller **10** künftig auf die richtigen Spuren **3** und Spurpaare zugreift, wird die Rekonfiguration in der Tabelle unter „Config.“ abgespeichert.

[0227] Basierend auf der Index-Funktion $f(i)$ verweist der logische Zylinder-Index („logic Cyl. Idx i “) mit $i = 0$ als erstes auf Zylinder „000 (0)“. Hier, auf Zylinder 000, verweist das Zahlenpaar aus der Konfigurations-Information („Config.“) auf die lokalen Index-Nummern (0, 1). Somit verbleibt die Datenspur **20** unverändert auf dem Zylinderpaar (000, 001). Mit $i = 1$ verweist der logische Zylinder-Index als nächstes auf Zylinder „004 (4)“. Hier verweisen die lokalen Index-Nummern des Zahlenpaares (4, 3) unter „Config.“ auf Zylinder „004 (4)“ und Zylinder „003 (3)“. Auch diese Datenspur **20** bleibt folglich unverändert.

[0228] Als nächstes wird im 1. Band mit dem logischen Zylinder-Index $i = 398$ auf den Zylinder 001 verwiesen und dort, auf Zylinder „001 (1)“, verweist „Config.“ auf die lokalen Index-Nummern (3, 2). Die zugehörige Datenspur **20** wurde aufgrund des Defekts im Band auf das Spurpaar mit den lokalen Index-Nummern (3, 2) verschoben, mithin auf das Zylinderpaar (003, 002).

[0229] Auf der Spur des Zylinders 003 (Zylinder-Index $i = 399$) verweist „Config.“ auf die lokalen Index-Nummern (2, 1), also auf die beiden Zylinder „002 (2)“ und „001 (1)“. Dieser Sektor **6** ist im Beispiel gemäß **Fig. 34** noch nicht belegt („Belegt“ = 0). Sobald der Sektor **6** beschrieben wird, wird das breite Schreibelement **16** über dem Zylinderpaar (002, 001) positioniert, so dass der defekte Sektor **44** auf Zylinder 001 als Distanzspur **14** fungiert und somit sind, trotz des Defekts, alle vier Spuren **3** im 1. Band verfügbar.

[0230] Das 2. Band ist im Beispiel vollständig belegt, und die Reorganisation erfolgt analog zum 1. Band, jedoch mit dem Unterschied, dass die Distanzspur **14** diesmal nach unten auf Zylinder 008 verschoben wird, da sich dort der defekte Sektor **44** befindet. Die neue Belegung und Reihenfolge ist in den Konfigurations-Informationen („Config.“) wie folgt festgelegt: Die Position der Spur **3** auf Zylinder 005 (Zylinder-Index $i = 2$) verbleibt mit den lokalen Index-Nummern (0, 1) unverändert. Auch die Spuren **3** auf Zylinder 009 und 006 (Zylinder-Index $i = 3$ und $i = 400$) bleiben unverändert. Für die Spur **3** auf Zylinder 008 (Index-

Nummer $i = 401$) verweist „Config.“ auf die lokalen Index-Nummern (2, 3). Die Sektordaten werden somit auf der Spur **3** des Zylinders 007 gespeichert, so dass die defekte Spur **3** auf Zylinder 008 nicht mehr stört.

[0231] Das 3. Band ist in diesem Beispiel in einem halb belegten Zustand. Der defekte Sektor **44** befindet sich auf Zylinder 014, also an der unteren Grenze des Bandes. Um das 3. Band dennoch bei Bedarf vollständig füllen zu können, wird die Distanzspur **14**, wie bei einem konventionellen Band **15**, an die untere Bandgrenze auf Zylinder 014 verschoben. Die vier intakten Spuren **3** oberhalb der neuen Distanzspur **14** werden nacheinander von oben nach unten mit der Datenspur **20** beschrieben.

[0232] Die Position der Spur **3** auf Zylinder 010 (Zylinder-Index $i = 4$) verbleibt unverändert. Für den Zylinderindex $i = 5$ sorgt die Konfigurations-Information („Config.“) für einen Verweis auf das Zylinderpaar (011, 012). Für Zylinder-Index $i = 402$ erfolgt ein Verweis auf das Zylinderpaar (012, 013) usw.

[0233] Das dargestellte Beispiel auf dem 199. Band entspricht dem 3. Band, mit dem Unterschied, dass diesmal die Distanzspur **14** an die obere Grenze des Bandes verlegt wird, mithin auf den defekten Sektor **44** des Zylinders 990. Dementsprechend wird das 199. Band nunmehr von unten nach oben beschrieben. Im Einzelnen wird beschrieben: Für die lokale Index-Nummer $i = 396$ das Zylinderpaar (994, 993), für $i = 397$ das Zylinderpaar (993, 992), für $i = 794$ das Zylinderpaar (992, 991) und zum Schluss mit $i = 795$ das Zylinderpaar (991, 990), wobei die neue Distanzspur **14** auf Zylinder 990 die Überbreite **18** des Schreibelements **16** aufnimmt.

[0234] Die Formel $f(g(a))$ ermittelt, basierend auf der Index-Funktion $f(i)$, die Zylindernummer c . Für die neunte Ausführungsform werden die Formeln der ersten Ausführungsform um eine lokale Indexierung erweitert, und zwar basierend auf den Einträgen in den Konfigurations-Informationen („Config.“). Dazu werden die Zahlenpaare (u, v) aus der Tabelle „Config.“ als Array ausgelesen,

$$(u, v) = \text{Config}[c]$$

wobei c die Zylindernummer ist und wobei (u, v) die resultierenden lokalen Index-Nummern sind. Die Variable u spezifiziert die Spur **3**, welche die Sektordaten enthält und die Variable v spezifiziert die als Distanz fungierende Spur.

[0235] Für Schreib- und Lesevorgänge berechnet die nachfolgende Gesamtformel das zuständige physikalische Spurpaar (u, v) , wobei a die LBA-Nummer eines Sektors **6** ist:

$$(u, v) = \text{Config}[f(g(a))]$$

[0236] Da die Array „Config“ im Fall eines defekten Sektors **44** die neue Anordnung des betroffenen Bandes enthält, können mit der Formel sowohl Bänder **21** im Ausgangszustand als auch rekonfigurierte Bänder angesteuert werden. Die lokalen Index-Nummern u und v lassen sich in die tatsächlichen physikalischen Zylindernummern umrechnen.

[0237] Das Flussdiagramm aus Fig. 35 zeigt den prinzipiellen Ablauf, wie in der neunten Ausführungsform nach einem fatalen Lesefehler (z. B. CRC-Fehler) geprüft werden kann, ob die betroffenen Sektordaten als Backup vorliegen und wie im Anschluss der defekte Sektor **44** „repariert“ werden kann, indem das Band rekonfiguriert wird.

[0238] In der ersten Operation **46** nimmt der Festplattencontroller **10** vom Computer die LBA-Nummer eines Sektors **6** entgegen, der gelesen werden soll. Die nachfolgende Operation **47** berechnet den zugehörigen physikalischen Zylinder **12** entsprechend der Formel $\text{Config}[f(g(a))]$ und der oben beschriebenen Vorgehensweise und positioniert das Leseelement **17** auf die benötigte Spur **3**, so dass im Anschluss mit Operation **48** der angeforderte Sektor **6** eingelesen werden kann. Im Rahmen der Verzweigung **49** wird nun geprüft, ob der Sektor **6** lesbar war. D. h. mögliche Lesefehler werden mit den verfügbaren Fehlerkorrektur-Informationen behoben und falls diese Vorwärts-Fehlerkorrektur erfolgreich ist, ist der Lesevorgang für diesen Sektor **6** abgeschlossen.

[0239] Anderenfalls, wenn die Fehler im Sektor **6** nicht mehr korrigierbar sind, wird im Rahmen der Verzweigung **50** geprüft, ob ein Backup-Spurabschnitt **45** verfügbar ist, welche eine Kopie des defekten Sektors **44** enthält. Zu diesem Zweck wird zunächst das Flag „Belegt“ der Nachbarspur ausgewertet, und zwar von der Nachbarspur in Richtung der Mitte des Bandes, mithin in Richtung der Distanzspur **14**. Falls es sich bei dieser Nachbarspur um die Distanzspur **14** handelt, so kann dieser erste Schritt übersprungen werden. Falls das „Belegt“-Flag der Nachbarspur den Wert „1“ enthält, ist die Nachbarspur in der Regel mit eigenen Daten belegt und ein Backup ist nicht verfügbar, so dass direkt zur Rekonfiguration des Bandes ab Operation **53** gesprungen wird. (Evtl. wird ein CRC-Fehler an das Betriebssystem ausgegeben.)

[0240] In allen anderen Fällen werden in einem zweiten Schritt die Einträge in der Tabelle unter „Status“ ausgewertet. Enthält der Sektor **6** auf der Nachbarspur bzw. der Distanzspur **14**, falls diese der Nachbar ist, unter „Status“ den selben Zahlenwert wie der defekte Sektor **44**, so ist ein Backup verfügbar, welches mit Operation **51** und Operation **52** ausgelesen wird. Anderenfalls, wenn die Zahlenwerte unterschiedlich sind, existiert kein Backup und es geht mit der Rekonfiguration des Bandes ab Operation **53** weiter.

[0241] Zum Auslesen des Backups wird mit Operation **51** das Leseelement **17** auf der entsprechenden Nachbarspur bzw. auf der Distanzspur **14** positioniert und mit Operation **52** wird das Backup vom zugehörigen Sektor **6** eingelesen.

[0242] Im Anschluss erfolgt die Rekonfiguration des betroffenen Bandes, welches den defekten Sektor **44** enthält. Hierzu wird zunächst in Operation **53** geprüft, um welchen Fall es sich handelt, mithin an welcher Position innerhalb des Bandes sich die Spur **3** mit dem defekten Sektor **44** befindet. Entsprechend der vier Fälle gemäß dem Beispiel aus **Fig. 34** wird die Distanzspur **14** um eine Spur nach oben oder nach unten verschoben oder an eine der Grenzen des Bandes verlegt. Die vier Fälle werden im folgenden auch „Band-Typ“ genannt. Wenn sich der neue Ort der Distanzspur **14** an einer Grenze des Bandes befindet, so wird auf ein Band **15** mit konventioneller Anordnung umgeschaltet, bei der alle Spuren **3** in eine Richtung überlappen.

[0243] Mit Operation **54** wird als nächstes das gesamte Band eingelesen und im Pufferspeicher **11** zwischengespeichert. (In einigen Fällen der Rekonfiguration reicht es auch aus, nur Sektoren **6** von einer Teilmenge der Spuren **3** einzulesen und neu zu schreiben.) Anschließend werden mit Operation **55** die Einträge in der Tabelle unter „Config.“ den neuen Gegebenheiten angepasst, so dass die neue Anordnung in der richtigen Reihenfolge geschrieben wird. Bei der neuen Anordnung handelt es sich um einen der vier Band-Typen, der in Operation **53** ermittelt worden ist. Die benötigten Tabellen-Einträge für Config[c] sind in **Fig. 34** dargestellt. Abschließend, nach der erfolgten Rekonfiguration der Tabelle, werden mit Operation **56** die im Pufferspeicher **11** zwischengespeicherten Sektordaten an ihre neuen Positionen zurückgeschrieben.

[0244] Falls sich in einem Band zwei fehlerhafte Spuren **3** befinden, kann eine zweite Ersatzspur gewonnen werden, indem das betroffene Band mit einem fehlerfreien Nachbarband zu einem doppelt so breiten Band zusammengelegt wird, nachfolgend Superband genannt. Das benötigte Nachbarband kann sich je nach Verfügbarkeit und Ausführungsform oberhalb oder unterhalb des defekten Bandes befinden. Weitere fehlerhafte Spuren **3** im selben defekten Band können kompensiert werden, indem mit jeder zusätzlichen fehlerhaften Spur **3** ein weiteres Nachbarband in das Superband aufgenommen wird.

Weitere Ausführungsformen

[0245] In der zweiten Ausführungsform ist ein symmetrisches Band **22** beschrieben, bei dem die Überlappungen der Datenspuren **20** invertiert angeordnet sind, d. h. jeweils mit Überlappungen in die entgegengesetzte Richtung. Bei dieser Variante besteht die

Möglichkeit, zur „Reparatur“ defekter Sektoren **44**, die Distanzspur **14** auf die Position der Spur **3** mit dem defekten Sektor **44** zu positionieren und dann die Grenzen zwischen den Bändern **40** auf die Höhe dieser neu positionierten Distanzspur **14** zu verschieben. Es entstehen Bänder **22** mit variabler Spuranzahl, welche durch die nunmehr als Distanzspur **14** fungierende fehlerhafte Spur **3** getrennt werden.

[0246] **Fig. 36** zeigt drei vollständig belegte Bänder **22**, deren Anordnung der zweiten Ausführungsform gemäß **Fig. 11** entspricht. In der Ausgangssituation besteht jedes Band **22** aus vier Spuren **3**. Zwischen den Bändern **22** befindet sich eine separate Distanzspur **14**. Im 2. Band auf der Spur **3** des Zylinders 007 („Cyl. 007“) befindet sich ein defekter Sektor **44**.

[0247] In **Fig. 37** wird das 2. Band nunmehr „repariert“, indem die Distanzspur **14** von Zylinder 005 auf die fehlerhafte Spur des Zylinders 007 verlegt wird. Das 1. Band vergrößert sich somit von vier Spuren auf sechs Spuren (Cyl. 001 bis Cyl. 006) und das 2. Band verkleinert sich von vier Spuren auf zwei Spuren (Cyl. 008 und Cyl. 009). Weiterhin sind auch nach der Modifikation alle Daten auf den Spuren **3** in den Bändern untergebracht.

[0248] Für die Modifikation der Spuranzahl des 1. und 2. Bandes ist es in diesem Fall ausreichend, nur eine einzige Datenspur **20** neu zu schreiben, und zwar auf das Zylinderpaar (006, 007). Die Spuren **3** der Zylinder 005 und 006 werden nunmehr zur Speicherung von Daten genutzt.

[0249] Auch in den anderen Fällen sind nur wenige Schreibvorgänge notwendig, um die Spuranzahl der Bänder **22** zu ändern und somit defekte Sektoren **44** zu „reparieren“. Beispielsweise sei angenommen, dass sich in **Fig. 36** der defekte Sektor **44** auf Zylinder 006 befindet. In diesem Fall kann die Rekonfiguration der Bänder **22** komplett ohne Schreibvorgang erfolgen, da sich die gleichen Daten des defekten Sektors **44** aufgrund des breiten Schreibelements **16** bereits auf der ehemaligen Distanzspur **14** des Zylinders 005 befinden.

[0250] Wenn Festplattenbereiche vom Dateisystem freigegeben werden, beispielsweise im Rahmen einer Defragmentierung, so kann ein Band, das von defekten Sektoren **44** betroffen ist, bei dieser Gelegenheit ohne zusätzliche Schreibvorgänge rekonfiguriert werden.

[0251] Des weiteren hat eine Rekonfiguration der Bänder in vielen Fällen keinen signifikanten Einfluss auf die Performance bei verteilten Schreibzugriffen auf belegte Festplattenbereiche. In **Fig. 37** gibt es nach der dargestellten Rekonfiguration beispielsweise weiterhin zwei Spuren **3** pro Band, die sich dank der Distanzspuren **14** ohne Write-Amplification über-

schreiben lassen. Insbesondere können die Sektor-
daten auf der Spur **3** des Zylinders 008 jederzeit
geändert werden, indem auf das Zylinderpaar (007,
008) geschrieben wird, wobei die fehlerhafte Spur **3**
auf Zylinder 007 als Distanzspur **14** fungiert.

[0252] Alle beschriebenen Verfahren zur Rekonfigu-
ration der Bänder lassen sich je nach Ausführungs-
form auf die Sektoren **6** eines geometrischem Sek-
tors (Kreisausschnitt der Plattenoberfläche **2**) anwen-
den oder auf die gesamten konzentrischen Spuren **3**
der von der Rekonfiguration betroffenen Bänder. Der
Fachmann wird erkennen, dass die letztere Vorge-
hensweise einen Versatz zu benachbarten geometri-
schen Sektoren **6** vermeidet und dass, je nach Ziel-
setzung, eine geeignete Variante zu wählen ist, wel-
che vorteilhaft für die Zugriffszeiten ist.

[0253] Defekte Sektoren **44**, die aufgrund ihrer Po-
sition und aufgrund eines gesetzten Limits hinsicht-
lich einer minimal und/oder einer maximal zulässigen
Spuranzahl pro Band nicht von einem Distanzbereich
14 abgedeckt werden können, können auf konven-
tionelle Weise mittels eines Reservebereichs (hot-fix-
area) ausgetauscht werden.

[0254] In den beschriebenen Ausführungsformen
entspricht die Breite des Distanzbereichs **14** der
Spurbreite **19** oder einem Vielfachen der Spurbreite
19. Die Distanzbereiche **14** fügen sich folglich exakt
in das Raster der Spuren **3** bzw. der Zylinder **12** ein.
Die Distanzbereiche **14** können aber auch in einer
anderen Breite ausgeführt werden, die insbesonde-
re kein Vielfaches der Spurbreite **19** ist, beispielswei-
se in 1.5-facher oder 2.5-facher Spurbreite **19**. Aus-
drücklich sei darauf hingewiesen, dass auch die Dis-
tanzbereiche **14** in der zweiten Ausführungsform ge-
mäß **Fig. 11** und in der neunten Ausführungsform ge-
mäß **Fig. 32 bis Fig. 35** aus mehr als einer Spur **3**
bestehen können.

[0255] Aus darstellungstechnischen Gründen beste-
hen in den Zeichnungen dieser Patentschrift viele
Bänder aus verhältnismäßig wenigen Spuren **3**. Aus-
drücklich sei darauf hingewiesen, dass andere Aus-
führungsformen auch eine größere Spuranzahl pro
Band haben können.

[0256] Der Fachmann wird erkennen, dass die ver-
schiedensten, in den Ausführungsformen dargelegten
Strategien hinsichtlich der Reihenfolge, in der die
Spuren **3** der Plattenoberflächen **2** beschrieben wer-
den, vielfältig kombiniert und/oder variiert werden
können. Es ist auch möglich, dass der Anwender
die verwendete Befüllungs-Strategie im Rahmen ei-
ner Reinitialisierung der SMR-Festplatte **1** auswählen
bzw. umschalten kann, um die SMR-Festplatte **1** für
einen neuen (oder für den ersten) Einsatzzweck zu
optimieren. Dies kann z. B. mittels eines Software-

Tools geschehen (zero-fill diagnostic utility, „low-le-
vel-format“, „mid-level-format“).

[0257] Der Festplattencontroller **10** kann auch wäh-
rend des laufenden Betriebs die Befüllungs-Strategie
wechseln und somit adaptiv auf die Charakteristik der
geschriebenen Daten eingehen. Beispielsweise lässt
sich auswerten, ob überwiegend neue Daten ergänzt
werden oder ob überwiegend Änderungen an besteh-
enden Daten stattfinden.

[0258] Die aufgeführten Ausführungsformen be-
schreiben die Erfindung am Beispiel einer SMR-Fest-
platte **1**. Alle Ausführungsformen und weitere Ausführ-
ungsformen können aber auch mit anderen Daten-
trägern umgesetzt werden, beispielsweise mit Band-
speicher oder Wechselspeicher. Die Schreibelemen-
te **16** und/oder Leselemente **17** können dabei bei-
spielsweise auf magnetischer oder optischer Basis
arbeiten oder auch mit Hitzeeinwirkung. Ebenso kön-
nen magnetische oder optische Speichervorgänge
durch gezielte Hitze unterstützt werden.

Bezugszeichenliste

- | | |
|----|--|
| 1 | Festplattenlaufwerk mit Shingled Magnetic Recording |
| 2 | Plattenoberfläche (Datenträger) |
| 3 | Spur |
| 4 | Äußerste Spur (maximaler Durchmesser) |
| 5 | Innerste Spur (minimaler Durchmesser) |
| 6 | Sektor |
| 7 | Spindel mit Drehachse |
| 8 | Schreiblesekopf |
| 9 | Actuator |
| 10 | Festplattencontroller |
| 11 | Speicher des Festplattencontrollers |
| 12 | Zylinder |
| 13 | Plattenstapel |
| 14 | Distanzbereich bzw. Distanzspur |
| 15 | Konventionelles Band |
| 16 | Schreibelement des Schreiblesekopfes |
| 17 | Leselement des Schreiblesekopfes |
| 18 | Überbreite des Schreibelements |
| 19 | Spurbreite |
| 20 | Datenspur des Schreibelements |
| 21 | Symmetrisches Band mit Distanzbereich in der Mitte |
| 22 | Symmetrisches Band mit Distanzbereichen an den Bandgrenzen |
| 23 | Sektoradresse a entgegennehmen |
| 24 | Logischen Zylinderindex i berechnen |
| 25 | Sektoradresse a im 1. oder im 2. Adressteilbereich? |
| 26 | Zylinderpaar (c, d) berechnen (2. Phase) |
| 27 | Schreibelement auf Zylinderpaar (c, d) positionieren |
| 28 | Sektor "c" als belegt markieren |
| 29 | Sektordaten schreiben |
| 30 | Zylinderpaar (c, d) berechnen (1. Phase) |

- 31** Nachbarspur "d" belegt?
- 32** Schreibelement auf Zylinderpaar (c, d) positionieren
- 33** Sektor "c" als belegt markieren
- 34** Sektordaten schreiben
- 35** Sektordaten "d" auslesen und Puffern
- 36** Schreibelement auf Zylinderpaar (c, d) positionieren
- 37** Sektor "c" als belegt markieren
- 38** Sektordaten schreiben
- 39** Gepufferte Sektordaten auf "d" zurückschreiben
- 40** Adressteilbereich
- 41** Dateiverwaltungstabelle, Inhaltsverzeichnis, Index oder Verwaltungsdaten
- 42** Optimierter Teilbereich ohne Write-Amplifikation
- 43** Remapping eines LBA-Teilbereichs
- 44** Defekter Sektor (nicht lesbar/schlecht lesbar)
- 45** Systemimmanente Backup-Spur bzw. Spurabschnitt
- 46** Sektoradresse a entgegennehmen
- 47** Zylinder berechnen, Leseelement positionieren
- 48** Sektordaten einlesen
- 49** Sektordaten lesbar?
- 50** Kopie auf Backup-Spur verfügbar?
- 51** Leseelement auf Backup-Spur positionieren
- 52** Backup-Daten einlesen
- 53** Benötigten Band-Typ ermitteln
- 54** Band einlesen und Puffern
- 55** Rekonfiguration der Tabelle "Config."
- 56** Band aus Puffer zurückschreiben

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 102013022051 [0008]
- US 8223458 [0010]
- US 8432633 [0010]
- US 7443625 [0018]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Suresh, Anand/Gibson, Garth/Ganger, Greg:
Shingled Magnetic Recording for Big Data
Applications, CMU-PDL-12-105, May 2012,
Parallel Data Laboratory, Carnegie Mellon
University, Pittsburgh [0019]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Speicherung von Daten-Einheiten (6) mittels eines Schreibelements (16), dessen effektive Spurbreite um eine Überbreite (18) größer ist als die Spurbreite (19) eines Leselements (17), wobei eine per Adresse angesprochene Daten-Einheit (6) mittels einer Steuereinheit (10) vom Schreibelement (16) in überlappenden Datenspuren (20) auf eine Datenträgeroberfläche (2) geschrieben wird, deren Spuren (3) mindestens teilweise in Bändern (15, 21, 22) gruppiert sind, wobei es zu jedem Band (15, 21, 22) mindestens einen Distanzbereich (14) gibt, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Adressbereich der Daten-Einheiten (6) in mindestens zwei Adressteilbereiche (40) aufgeteilt wird, wobei für jedes Band (15, 21, 22) eine Teilauswahl von Spuren (3) jeweils einem Adressteilbereich (40) zugeordnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Adressteilbereich (40), dessen adressierbare Daten-Einheiten (6) beim Befüllen der Datenträgeroberfläche (2) als erstes und/oder überwiegend in Anspruch genommen werden, pro Band (15, 21, 22) eine Teilauswahl an Spuren (3) verwendet, welche so weit auseinander liegen, dass beim Überschreiben einer beliebigen Spur (3) aus besagter Teilauswahl keine der anderen Spuren (3) aus der besagten Teilauswahl von der Datenspur (20) des Schreibelements (16) gelöscht werden.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, gekennzeichnet durch ein Band (21), dessen zugehöriger Distanzbereich (14) sich in der Nähe der Mitte des Bandes (21) befindet, wobei die beiden zum Distanzbereich (14) benachbarten Spuren (3) beidseitig so beschrieben werden, dass mindestens ein Teil der Überbreite (18) des Schreibelements (16) jeweils auf dem Distanzbereich (14) zu liegen kommt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Überlappungen der Datenspuren (20) des Schreibelements (16) innerhalb des Bandes (21) beidseitig, ausgehend von den beiden äußeren Grenzen des Bandes (21), nach innen in Richtung des Distanzbereichs (14) angeordnet werden und beidseitig auf dem Distanzbereich (14) zusammenlaufen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Befüllen der Datenträgeroberfläche (2) mit Daten-Einheiten (6) in einer ersten Phase, welche einem ersten Adressteilbereich (40) zugeordnet ist, in jedem teilnehmenden Band (21) zunächst die beiden äußeren Spuren (3), welche beidseitig an den äußeren Grenzen der Bänder (21) liegen, mit Daten-Einheiten (6) beschrieben werden und dass erst dann, wenn diese äußeren Spuren (3) überwiegend oder vollständig belegt sind, in mindestens einer weiteren Phase und mit-

tels weiterer Adressteilbereiche (40) sukzessive damit begonnen wird, in jedem Band (21) die zur Mitte des Bandes (21) hin benachbarten Spuren (3) zu beschreiben, wobei die beiden Spuren (3), welche an den Distanzbereich (14) angrenzen, erst als letztes beschrieben werden, wenn alle anderen Spuren (3) der Bänder (21) überwiegend oder vollständig belegt sind.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, gekennzeichnet durch zwei benachbarte Bänder (22), deren Distanzbereich (14) sich an der gemeinsamen Grenze dieser Bänder (22) befindet, wobei die grenznahen Spuren (3) der benachbarten Bänder (22) im jeweiligen Band (22) so beschrieben werden, dass mindestens ein Teil der Überbreite (18) des Schreibelements (16) jeweils auf dem angrenzenden Distanzbereich (14) zu liegen kommt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Überlappungen der Datenspuren (20) des Schreibelements (16) innerhalb des jeweiligen Bandes (22), ausgehend von zwei benachbarten Spuren (3) in der Nähe der Mitte des Bandes (22), beidseitig nach außen in Richtung der äußeren Grenzen der Bänder (22) angeordnet werden und dort auf den Distanzbereichen (14) auslaufen.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Befüllen der Datenträgeroberfläche (2) mit Daten-Einheiten (6) in einer ersten Phase, welche einem ersten Adressteilbereich (40) zugeordnet ist, in jedem teilnehmenden Band (22) zunächst zwei benachbarte Spuren (3) aus der Nähe der Mitte des jeweiligen Bandes (22) mit Daten-Einheiten (6) beschrieben werden und dass erst dann, wenn diese Spuren (3) überwiegend oder vollständig belegt sind, in mindestens einer weiteren Phase und mittels weiterer Adressteilbereiche (40) sukzessive damit begonnen wird, in jedem Band (22) die zu den Grenzen der Bänder (22) nach außen hin benachbarten Spuren (3) zu beschreiben, wobei die Spuren (3), welche an den Grenzen der Bänder (22) liegen, erst als letztes beschrieben werden, wenn alle anderen Spuren (3) der Bänder (22) überwiegend oder vollständig belegt sind.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Befüllen der Datenträgeroberfläche (2) mit Daten-Einheiten (6) in einer ersten Phase, welche einem ersten Adressteilbereich (40) zugeordnet ist, in jedem teilnehmenden Band (15) zunächst eine äußere Spur (3), welche an der ersten Grenze des jeweiligen Bandes (15) liegt, mit Daten-Einheiten (6) beschrieben wird und dass erst dann, wenn diese äußere Spur (3) in allen oder in der Mehrzahl der Bänder (15) belegt ist, in mindestens einer weiteren Phase und mittels weiterer Adressteilbereiche (40) sukzessive damit begonnen wird, in jedem Band (15) die zur zweiten Grenze des

jeweiligen Bandes (15) hin benachbarten Spuren (3) zu beschreiben, wobei die Spur (3), welche an der zweiten Grenze des jeweiligen Bandes (15) liegt, erst als letztes beschrieben wird, wenn alle anderen Spuren (3) der Bänder (15) überwiegend oder vollständig belegt sind.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass, falls beim Lesen einer Spur (3) mittels des Leseelements (17) ein Lesefehler durch einen defekten Spurabschnitt (44) auftritt, mittels Verwaltungsdaten oder durch einen Ähnlichkeitsvergleich geprüft wird, ob ein benachbarter oder ein in der Nähe liegender Backup-Spurabschnitt (45) aus einer weiteren Spur (3) oder aus einem Distanzbereich (14) existiert, welcher mittels der Überbreite (18) des Schreibelements (16) mit identischen Daten beschrieben ist und falls dies zutrifft, die Daten des Backup-Spurabschnitts (45) zusätzlich oder als Ersatz für die Daten des defekten Spurabschnitts (44) verwendet werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Austausch eines defekten Spurabschnitts (44) erfolgt, indem auf der Datenträgeroberfläche (2) mindestens ein Teil eines Distanzbereichs (14) auf die physikalische Position des defekten Spurabschnitts (44) verschoben wird, und indem der frei gewordene, vormalige Distanzbereich (14) ersatzweise zur Speicherung von Daten verwendet wird.

12. Speichervorrichtung (1) mit mindestens einer Datenträgeroberfläche (2) mit einer Veilzahl an Spuren (3) sowie mit mindestens einem Leseelement (17) und mit mindestens einem Schreibelement (16), wobei die effektive Spurbreite des Schreibelements (16) um eine Überbreite (18) größer ist als die Spurbreite (19) des Leseelements (17), **dadurch gekennzeichnet**, dass sich ein Distanzbereich (14) zwischen einer ersten Spur (3) und einer zweiten Spur (3) befindet, wobei für die erste Spur (3) die Datenspur (20) vom Schreibelement (16) so geschrieben ist, dass ein der zweiten Spur (3) zugewandter Teil des Schreibelements (16) auf dem benachbarten Distanzbereich (14) liegt und wobei für die zweite Spur (3) die Datenspur (20) vom Schreibelement (16) so geschrieben ist, dass ein der ersten Spur (3) zugewandter Teil des Schreibelements (16) ebenfalls auf dem benachbarten Distanzbereich (14) liegt und wobei auf dem Distanzbereich (14) die zur ersten Spur (3) gehörenden Daten mindestens teilweise von Daten überschrieben sind, die zur zweiten Spur (3) gehören.

13. Speichervorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Auswahl an benachbarten Spuren (3) in einem Band (21, 22) gruppiert ist und dass beidseitig, jeweils zwischen einer Position in der Nähe der Mitte des Bandes (21, 22) und den beiden äußeren Grenzen des Bandes

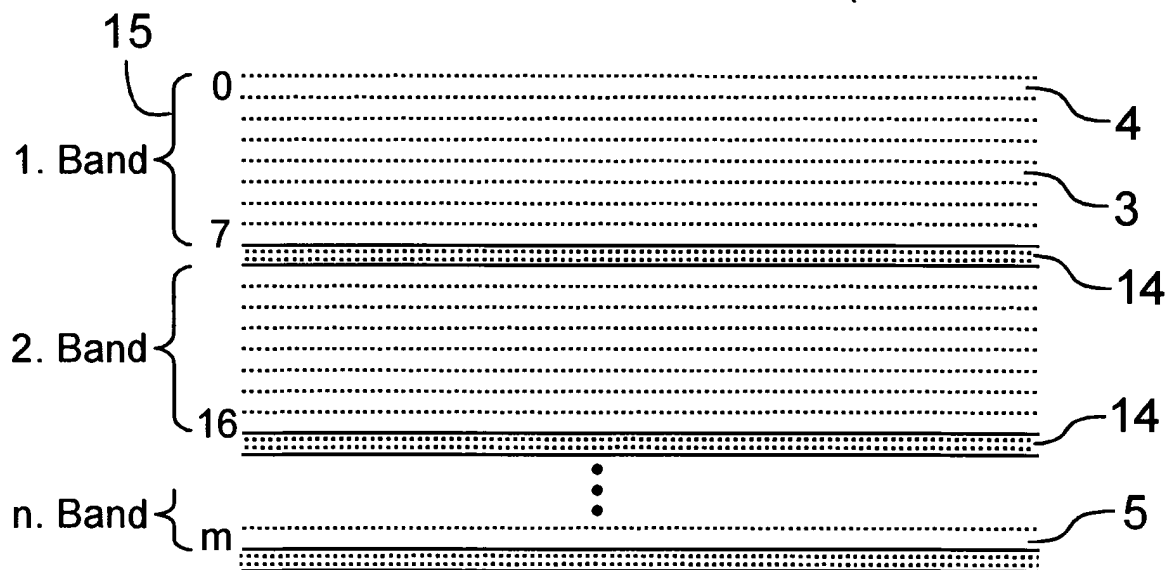
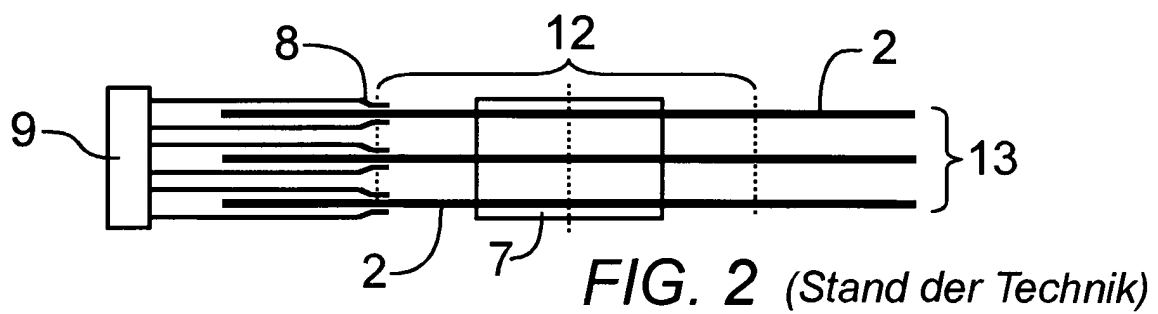
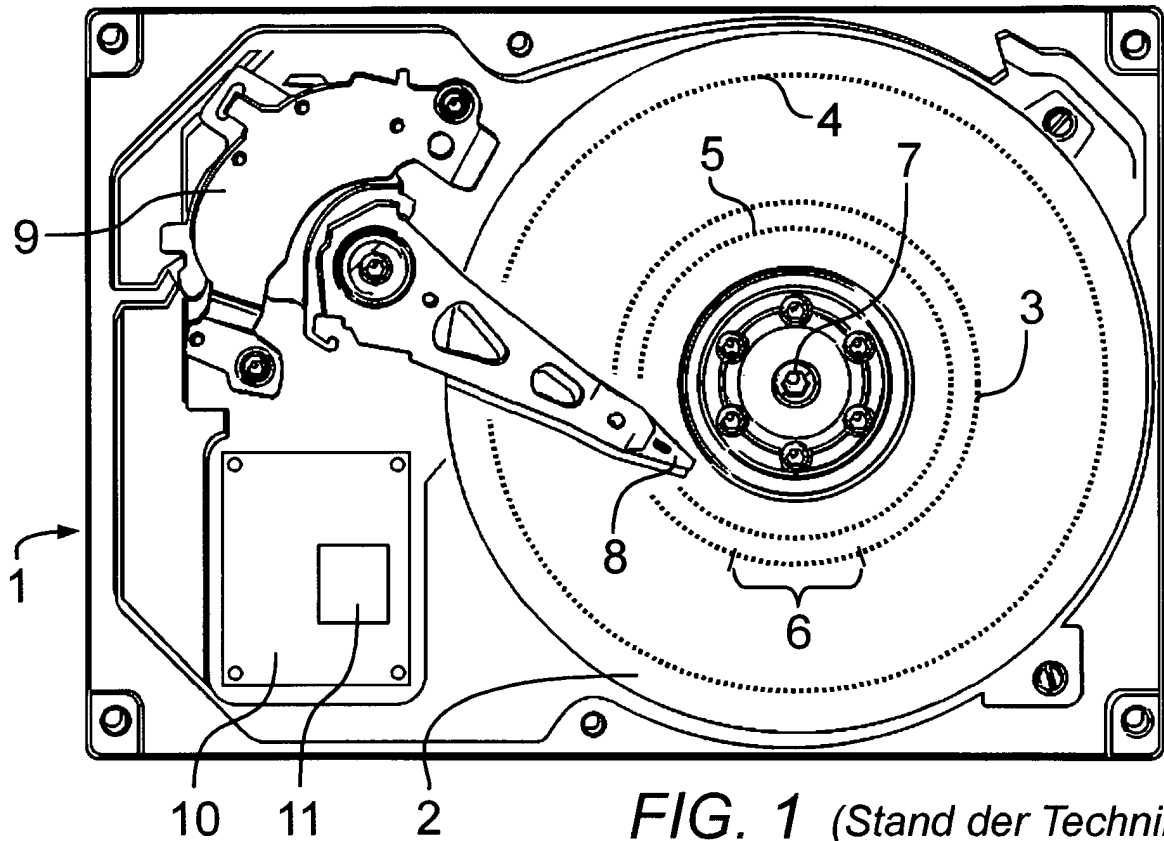
(21, 22), überlappende Datenspuren (20) mit entgegengesetzter Überlappungs-Richtung vom Schreibelement (16) geschrieben sind.

14. Speichervorrichtung nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch eine Datenträgeroberfläche (2), auf der jeweils eine Spur (3) und ein Distanzbereich (14) im Wechsel angeordnet sind, wobei die Breite der Distanzbereiche (14) größer-gleich der Spurbreite (19) der Spuren (3) ist und wobei das Schreibelement (16), dessen effektive Spurbreite größer-gleich der dreifachen Spurbreite (19) des Leseelements (17) ist, so positioniert ist, dass der mittlere Bereich des Schreibelements (16) Daten auf eine Spur (3) schreibt und jeweils die Hälfte der gesamten Überbreite (18) des Schreibelements (16) vorhandene Daten auf den beidseitig benachbarten Distanzbereichen (14) überschreibt.

15. Speichervorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, gekennzeichnet durch einen defekten Spurabschnitt (44) aus einer Spur (3) und einem benachbarten oder in der Nähe liegenden Backup-Spurabschnitt (45), aus einer weiteren Spur (3) oder aus einem Distanzbereich (14), die gemeinsam mit der Datenspur (20) des überbreiten (18) Schreibelements (16) mit identischen Daten beschrieben sind, wobei der Backup-Spurabschnitt (45) eine temporäre Sicherheitskopie für den defekten Spurabschnitt (44) ist, solange der Backup-Spurabschnitt (45) nicht mit anderen Daten überschrieben ist.

Es folgen 28 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



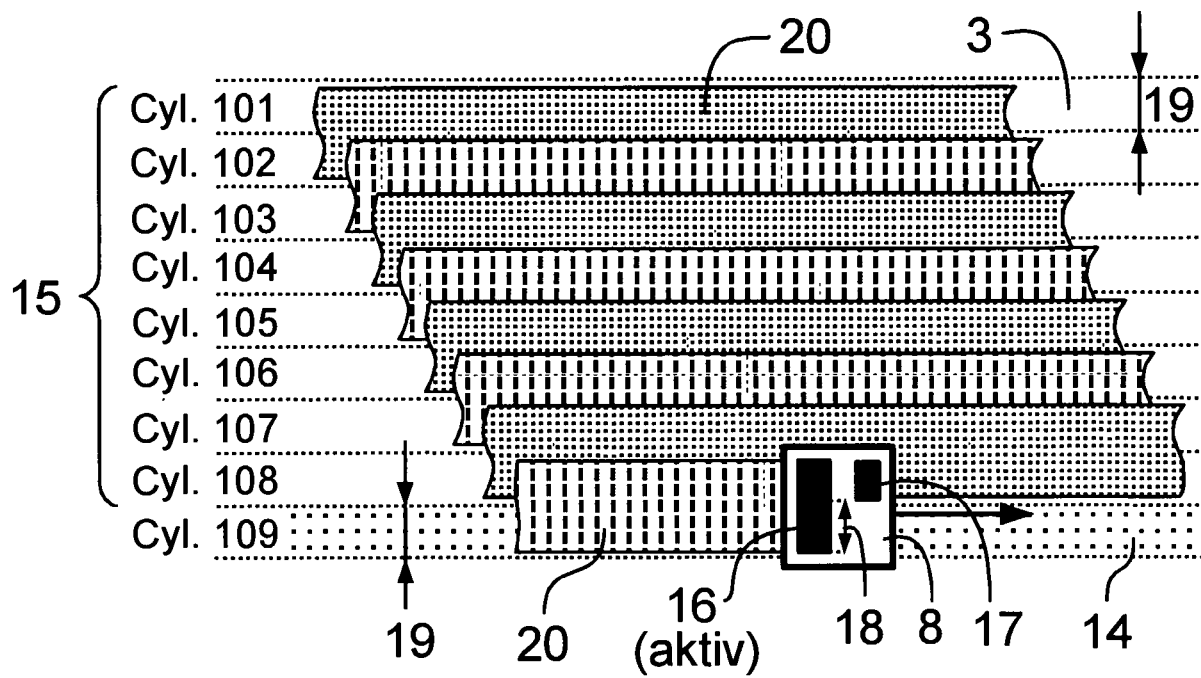


FIG. 4 (Stand der Technik)

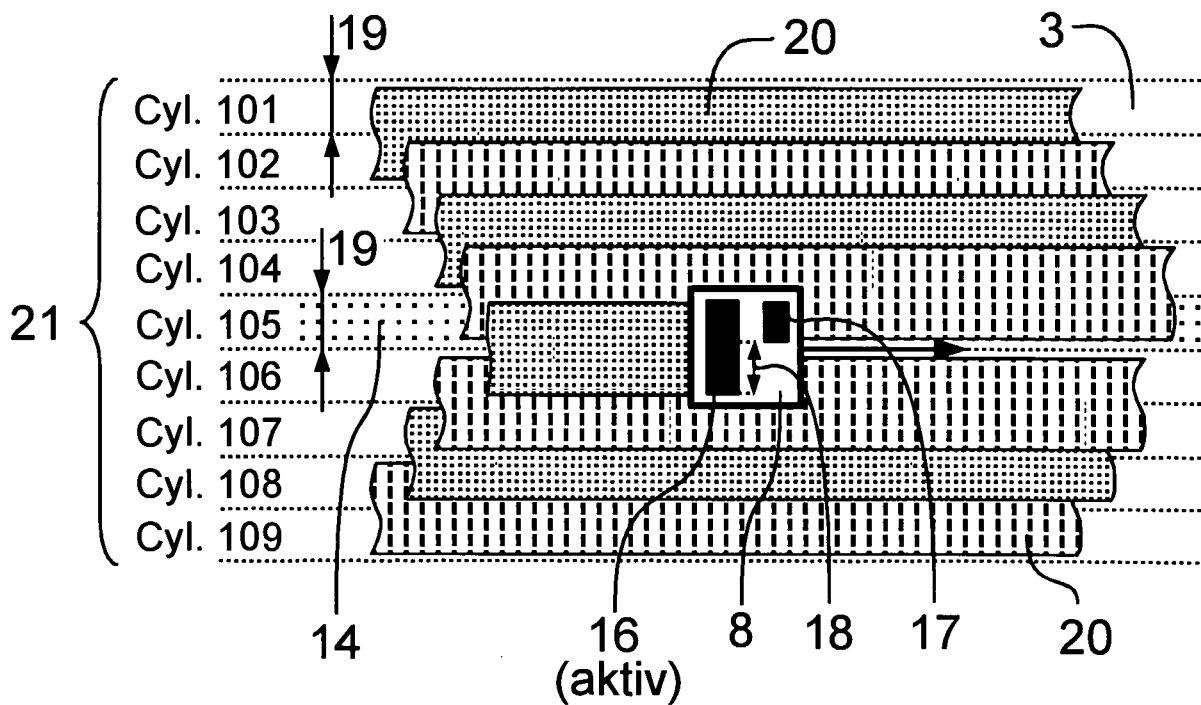


FIG. 5

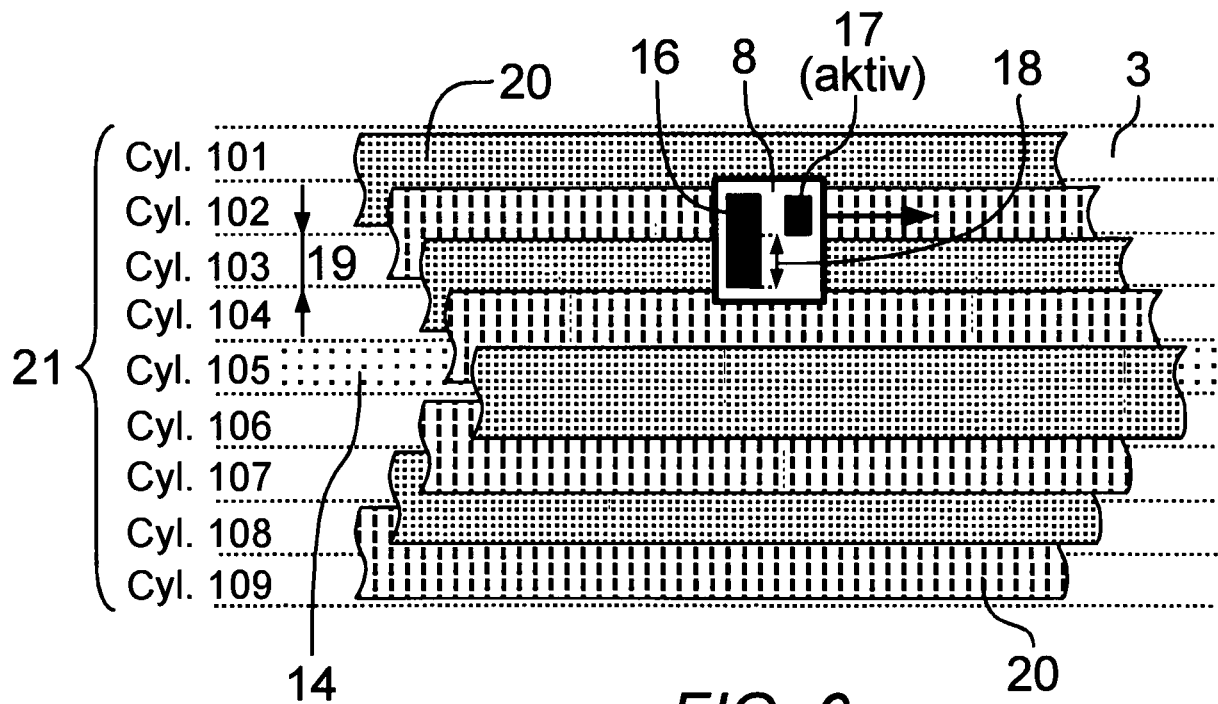


FIG. 6

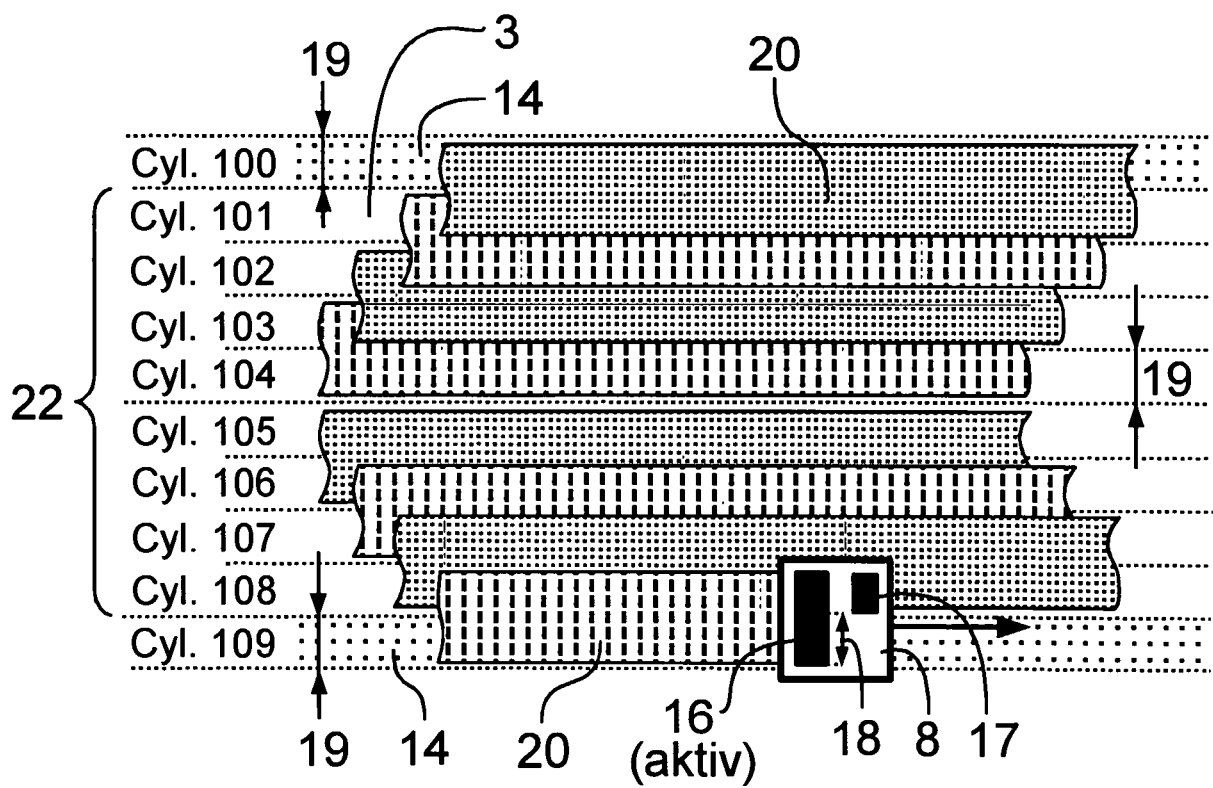


FIG. 7

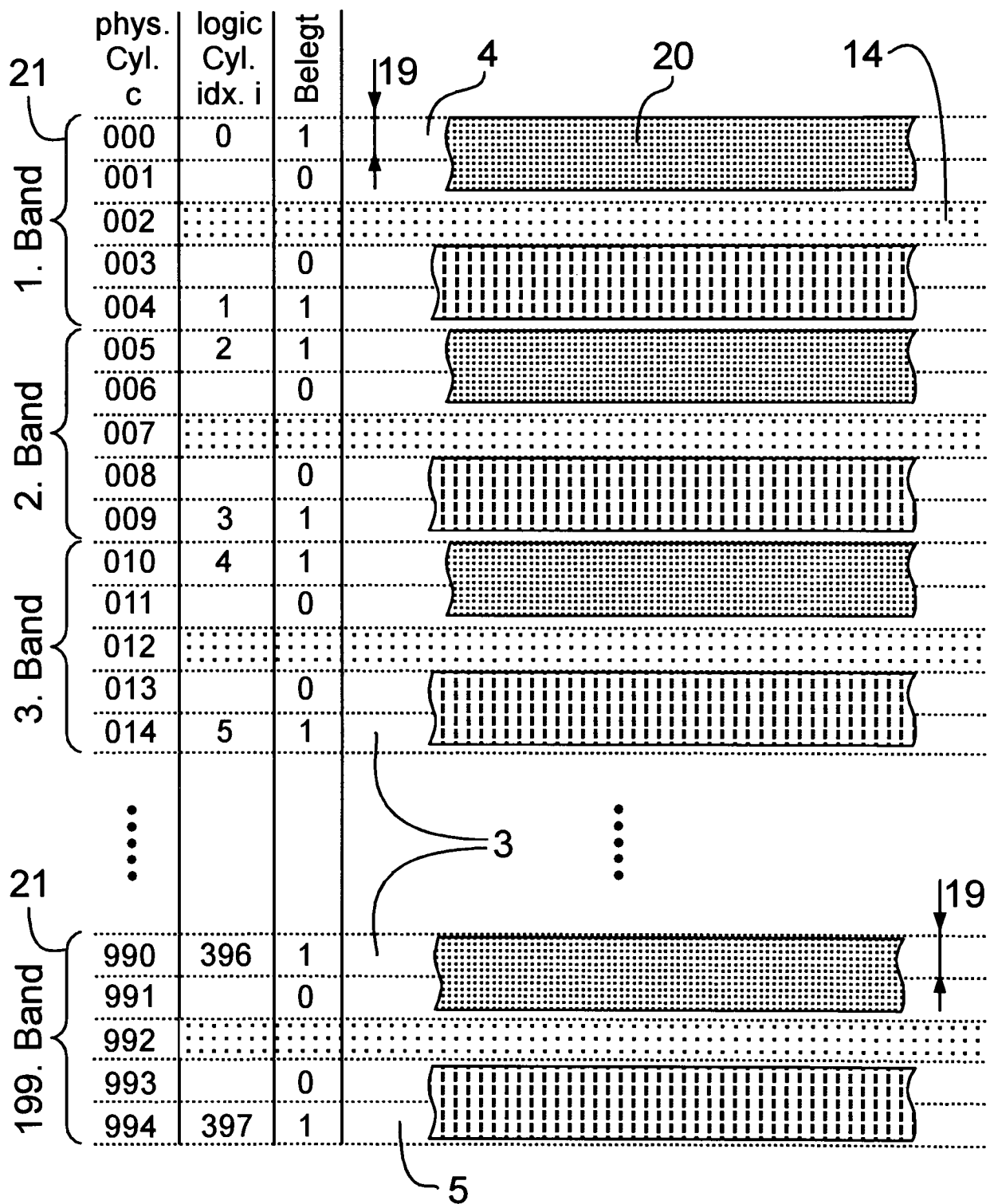


FIG. 8

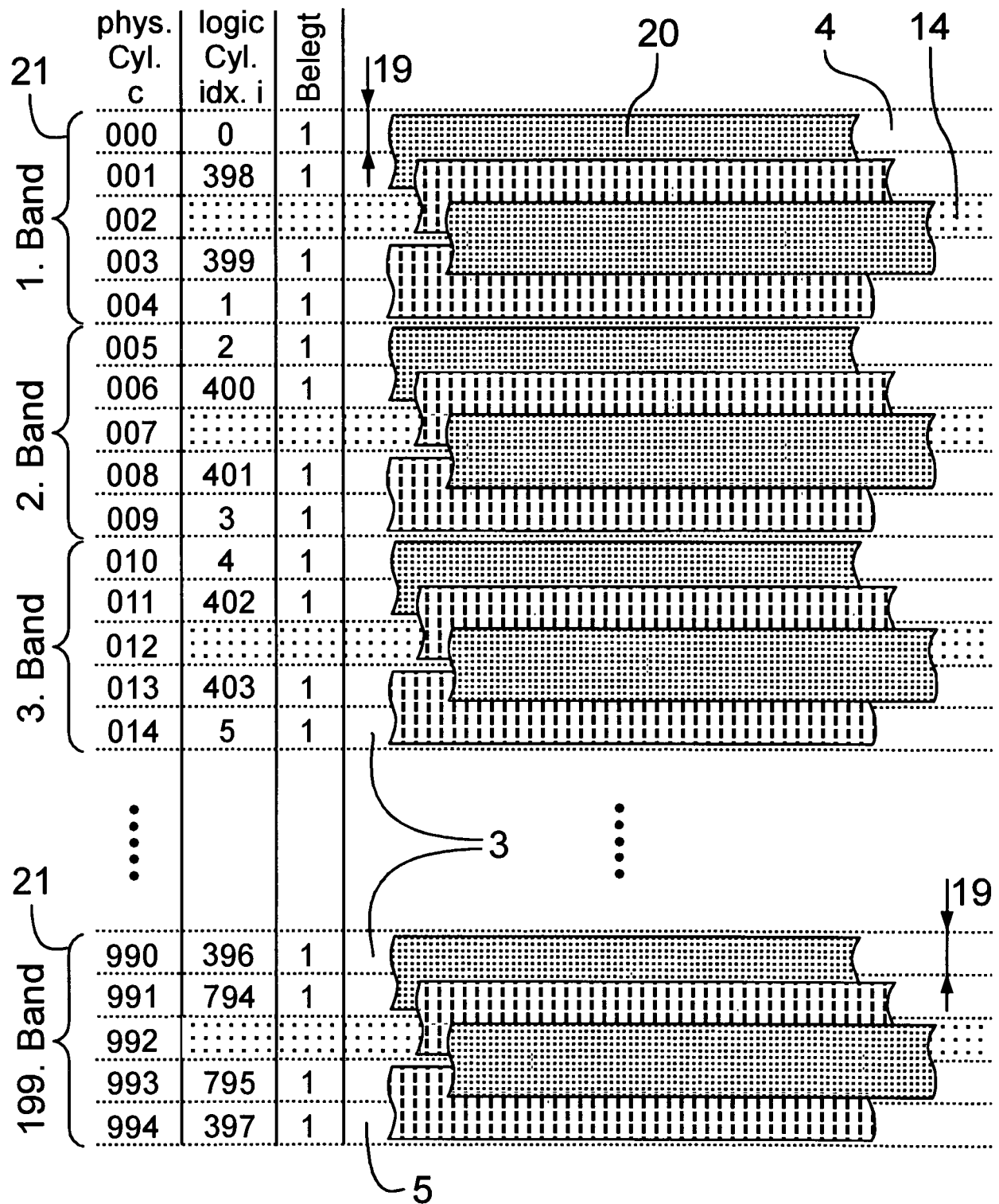


FIG. 9

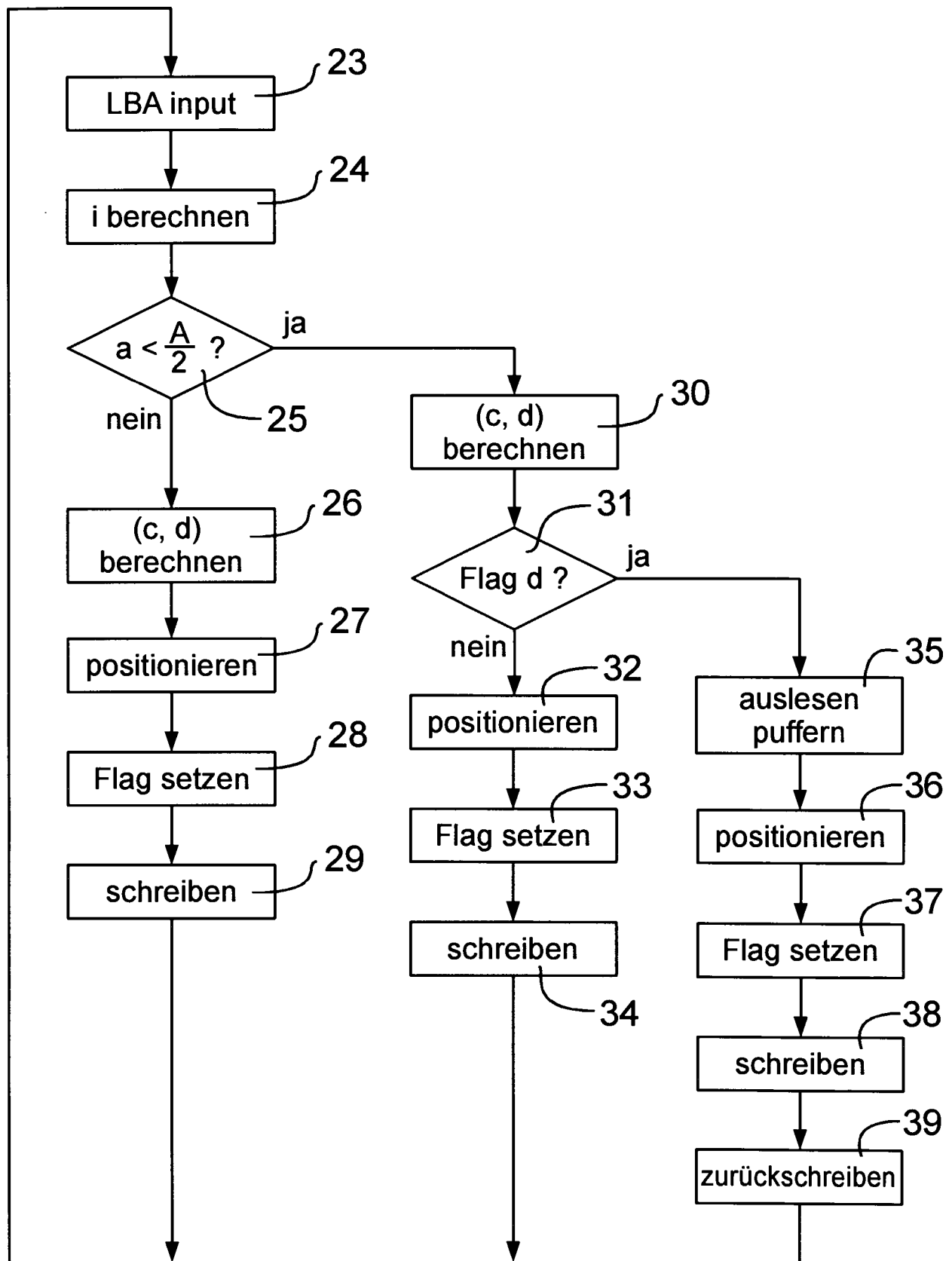


FIG. 10

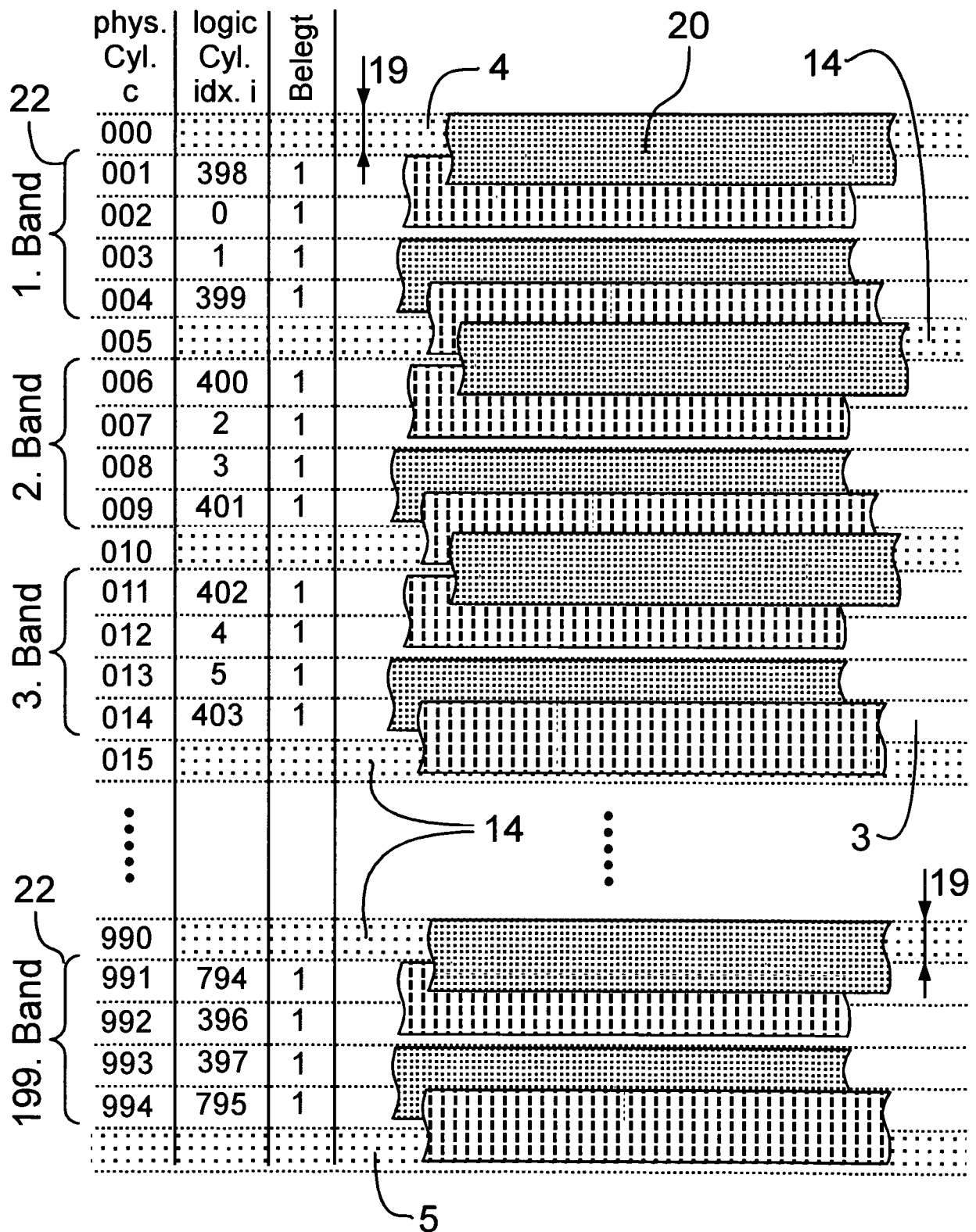


FIG. 11

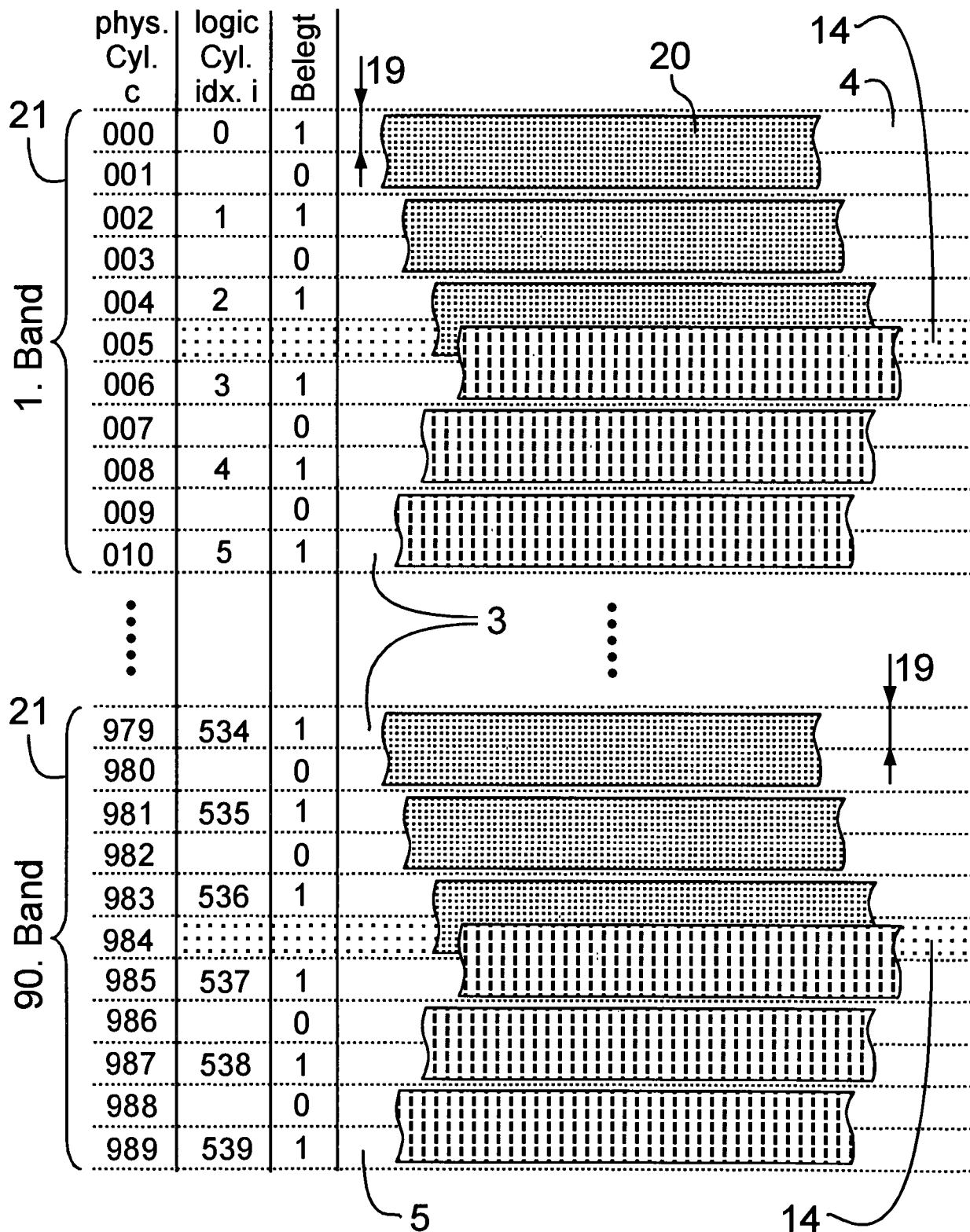


FIG. 12

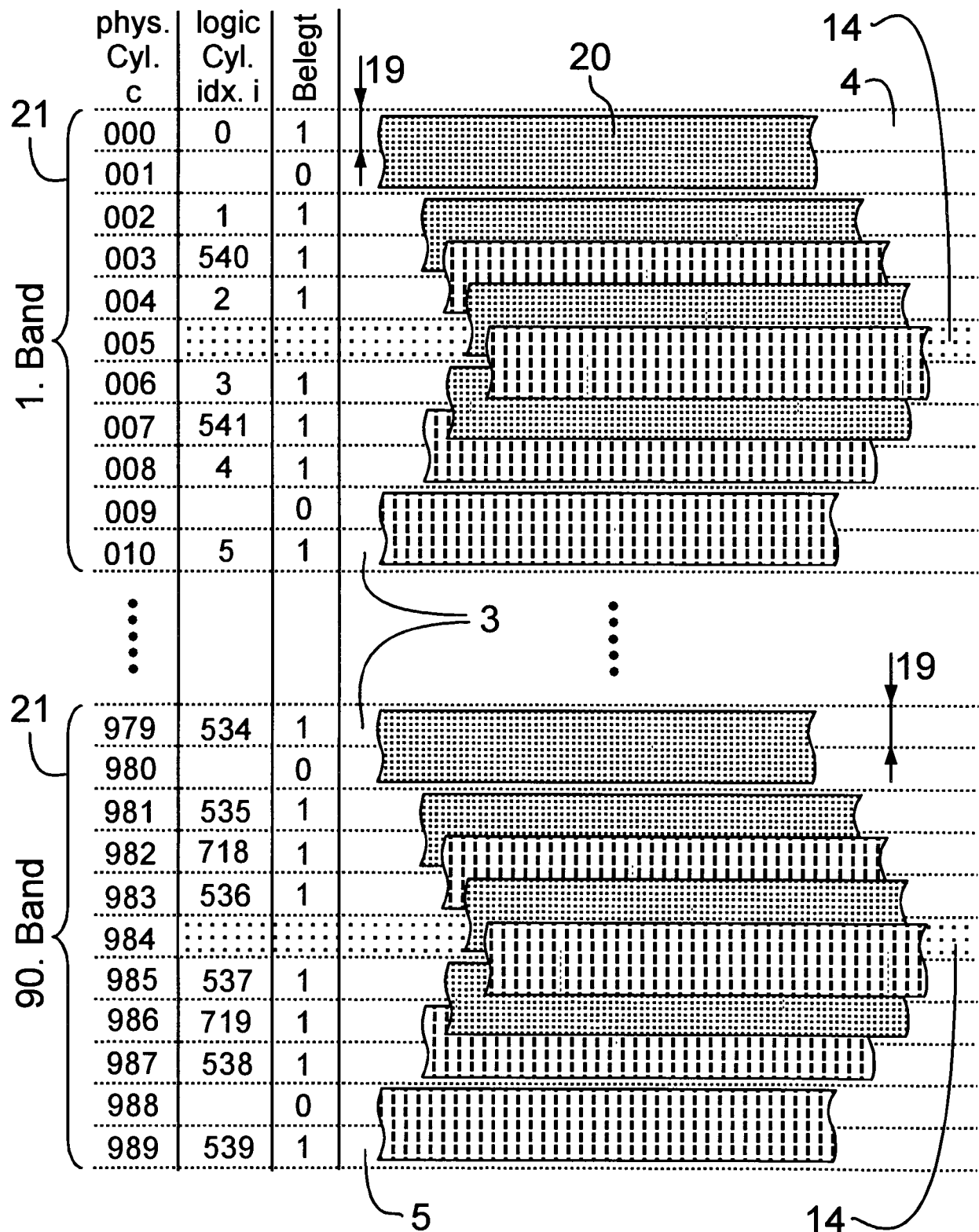


FIG. 13

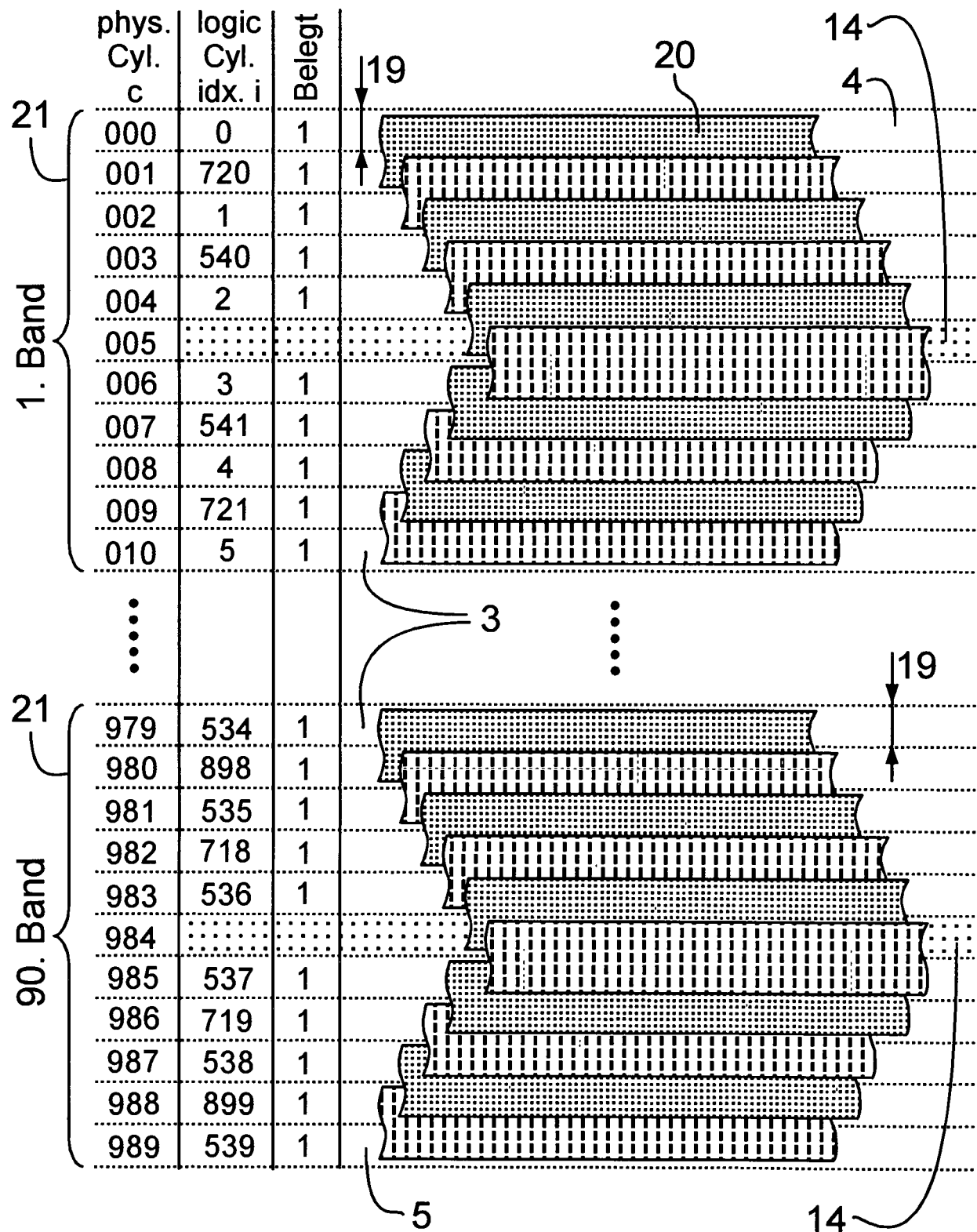


FIG. 14

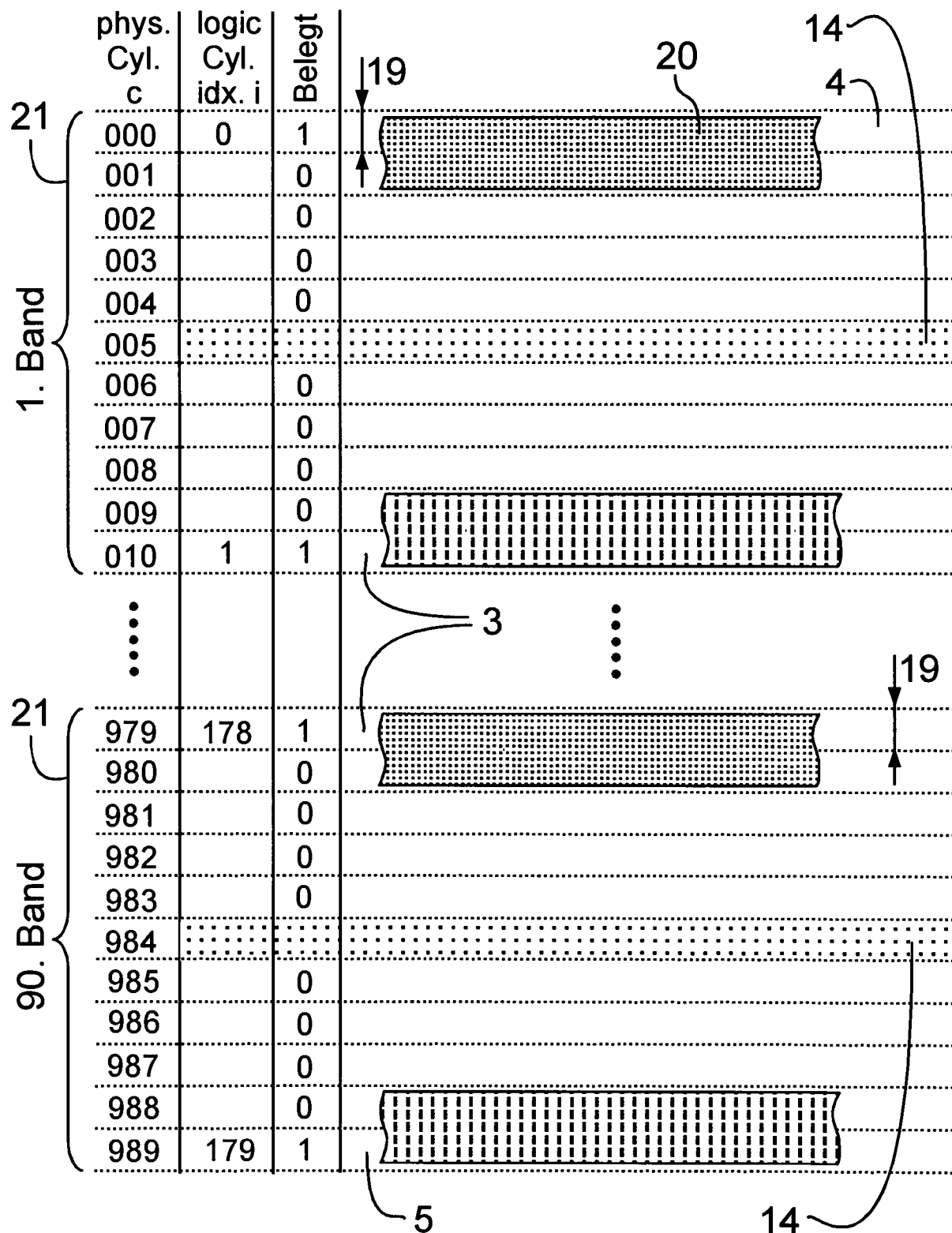


FIG. 15

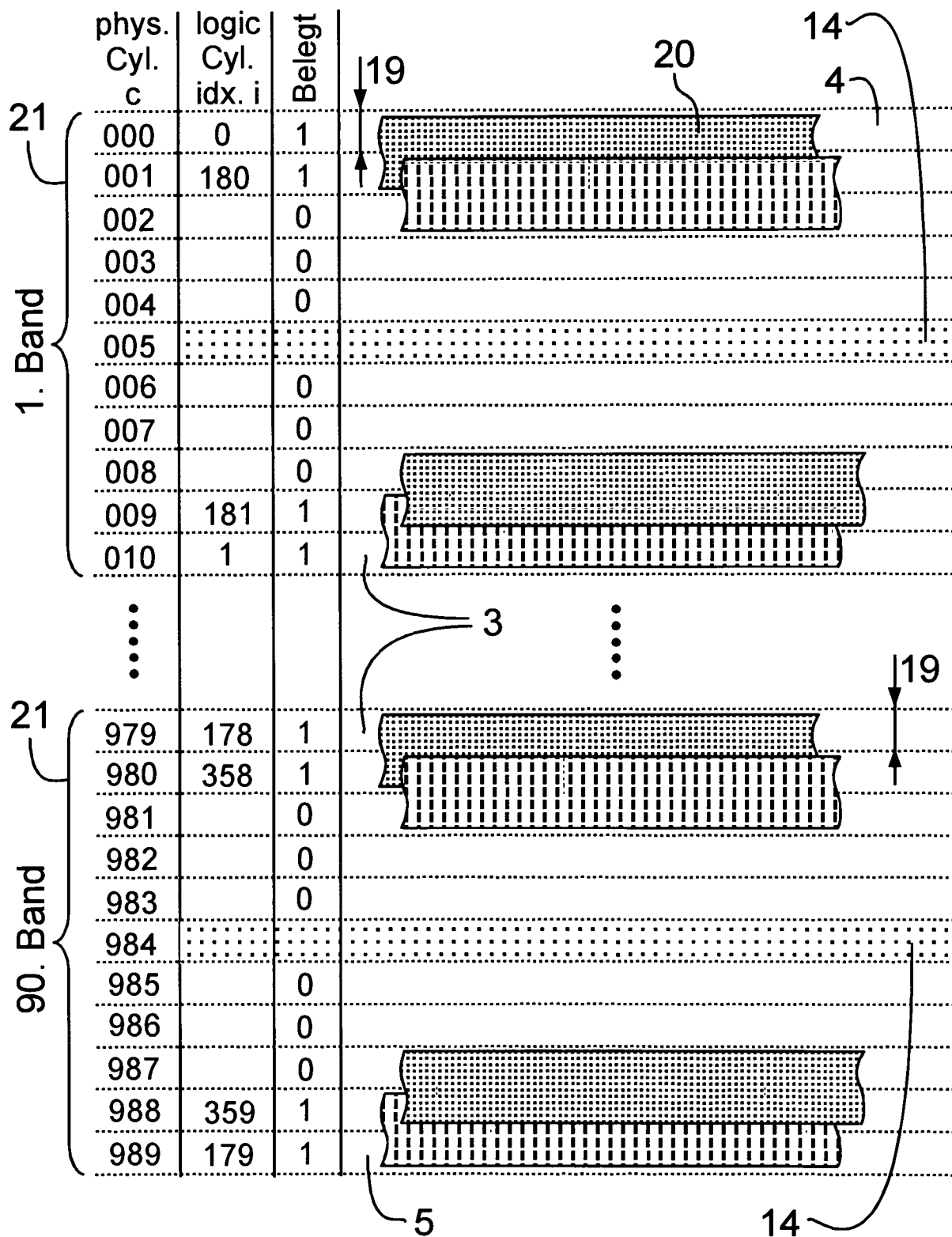


FIG. 16

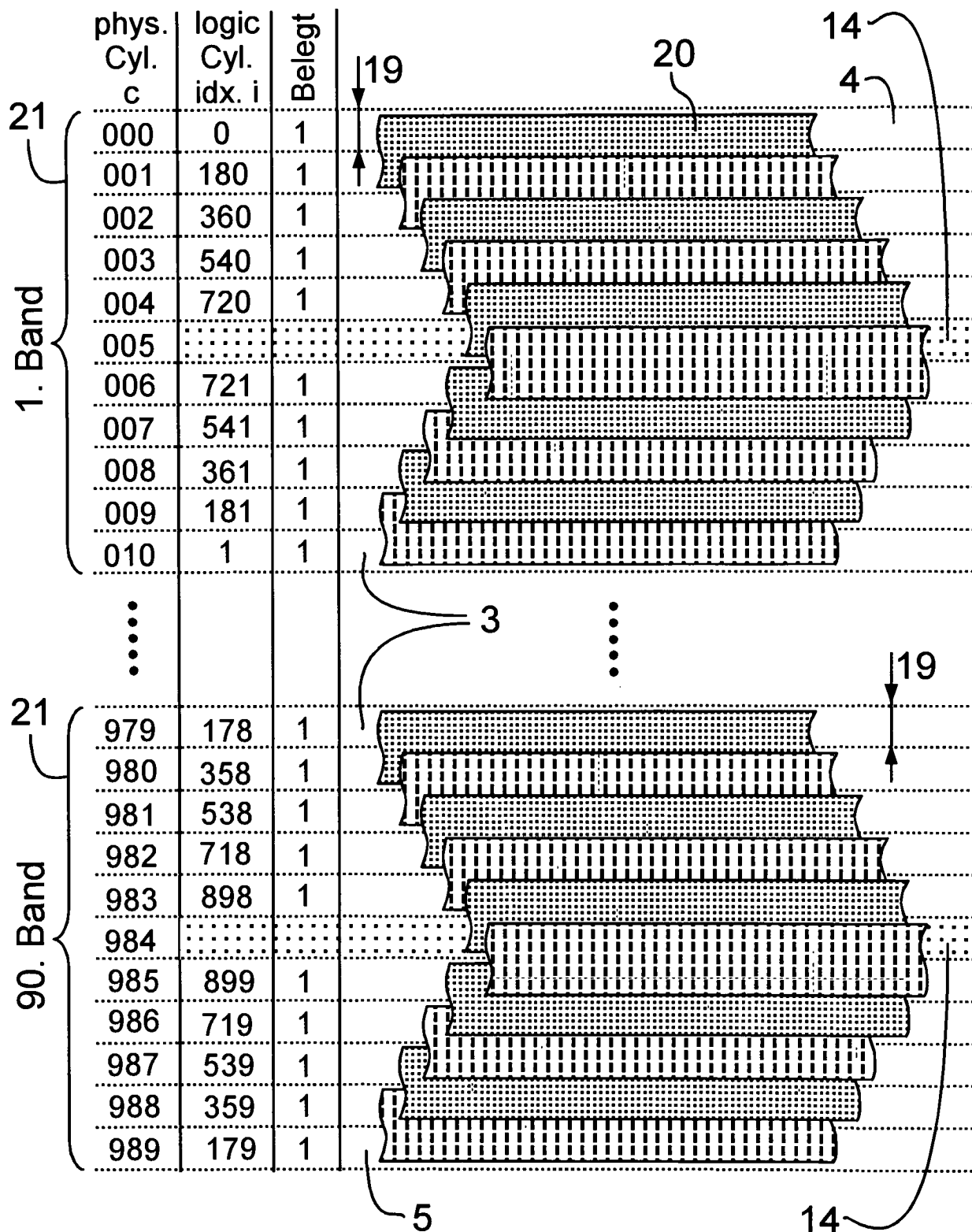


FIG. 17

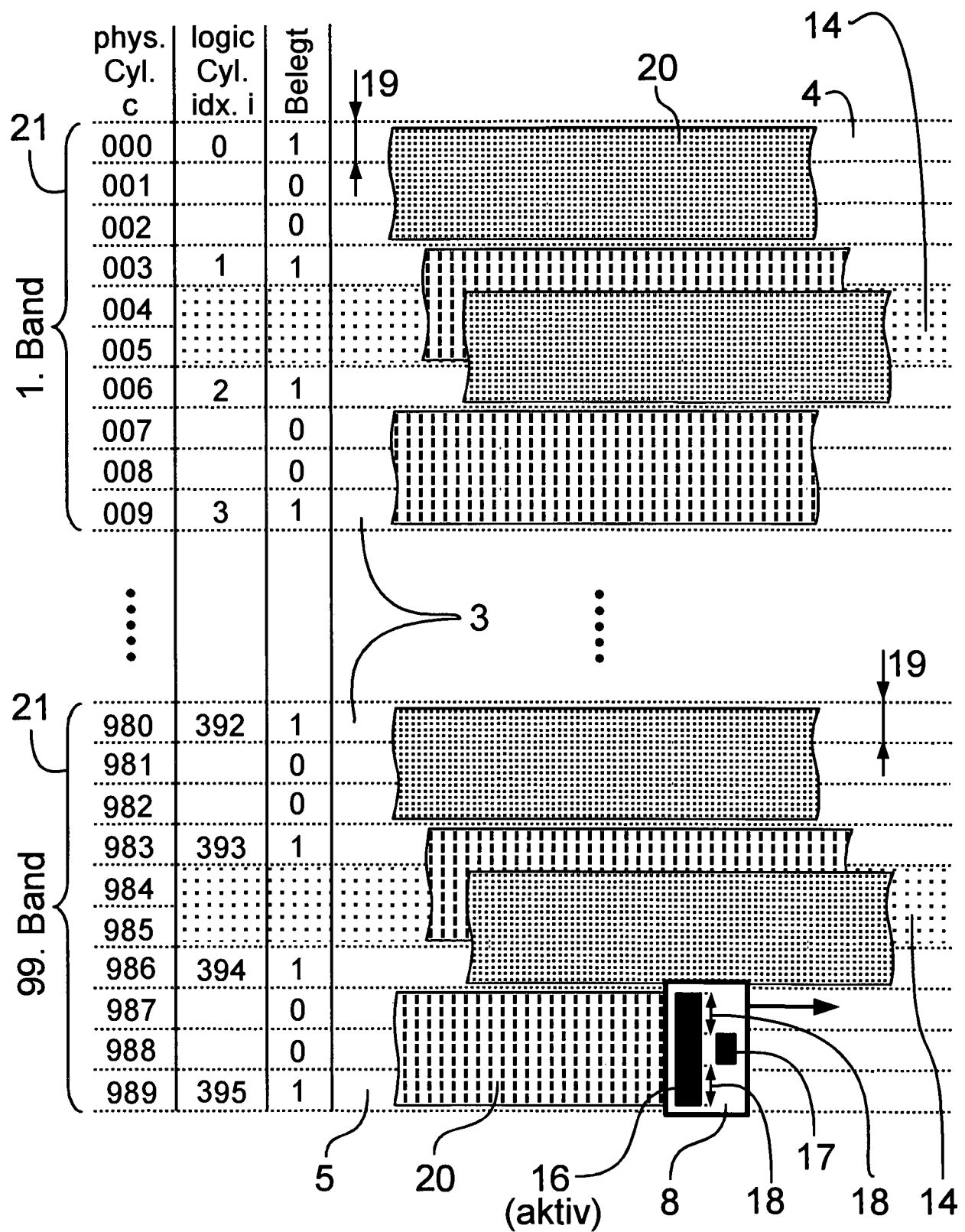


FIG. 18

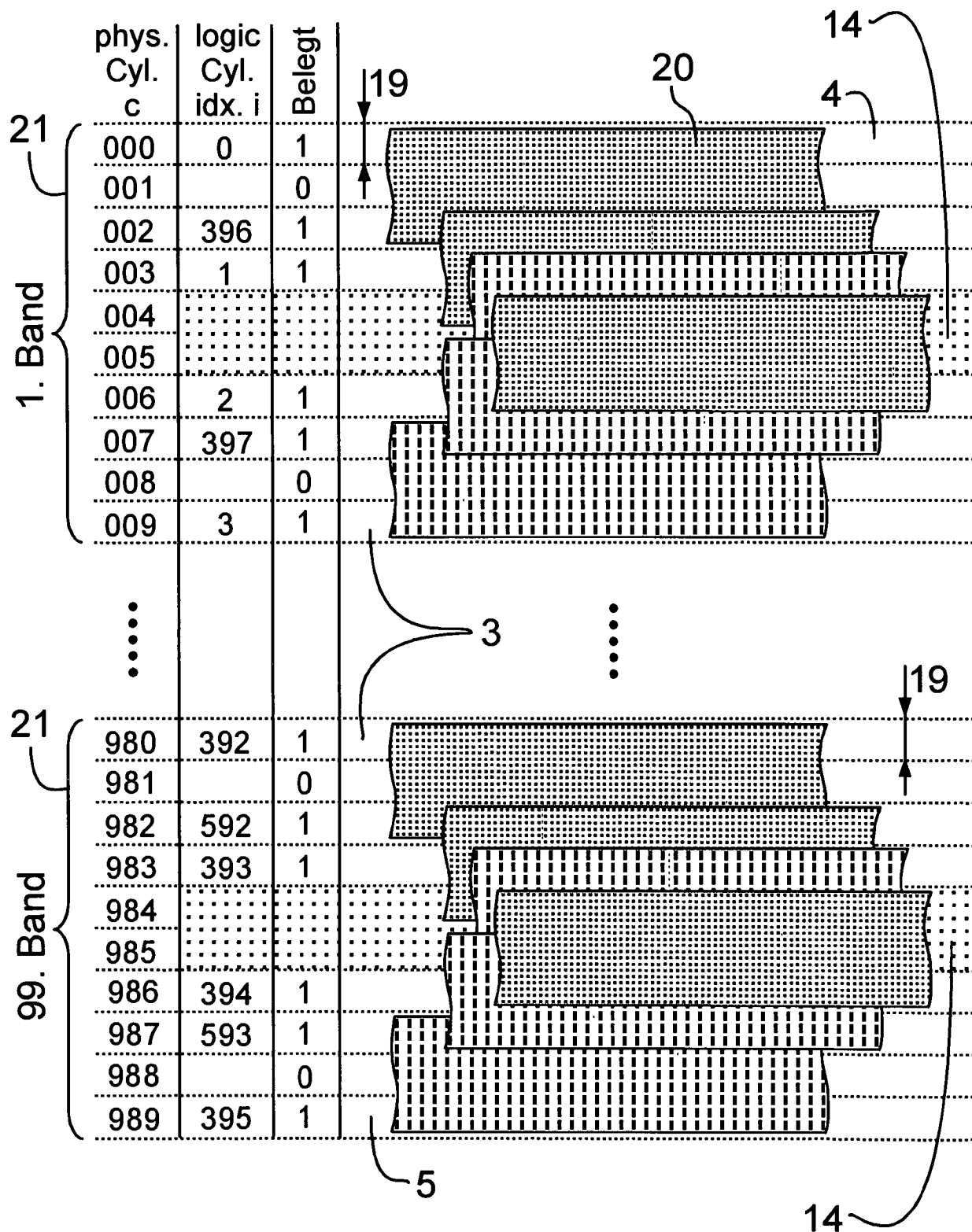


FIG. 19

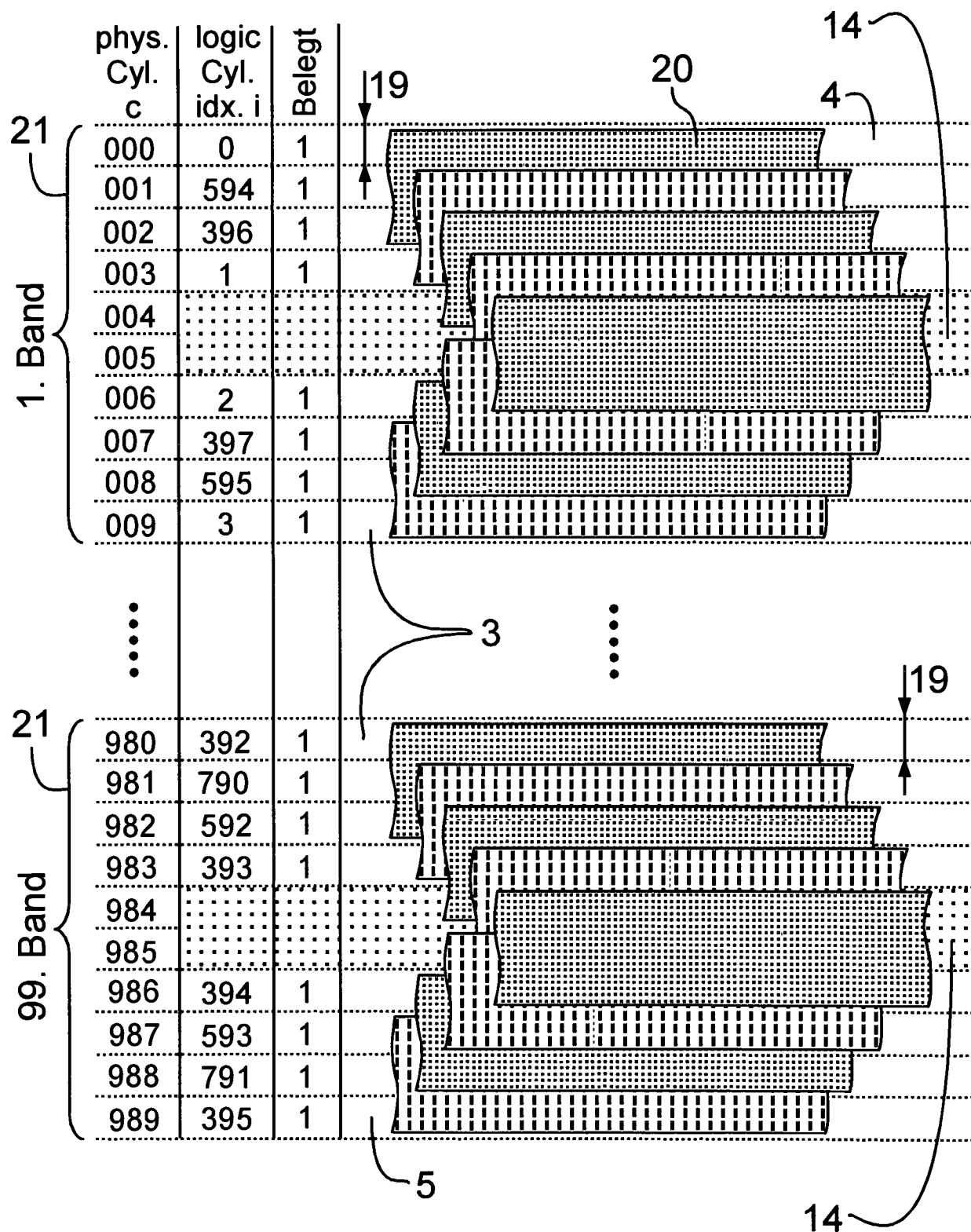


FIG. 20

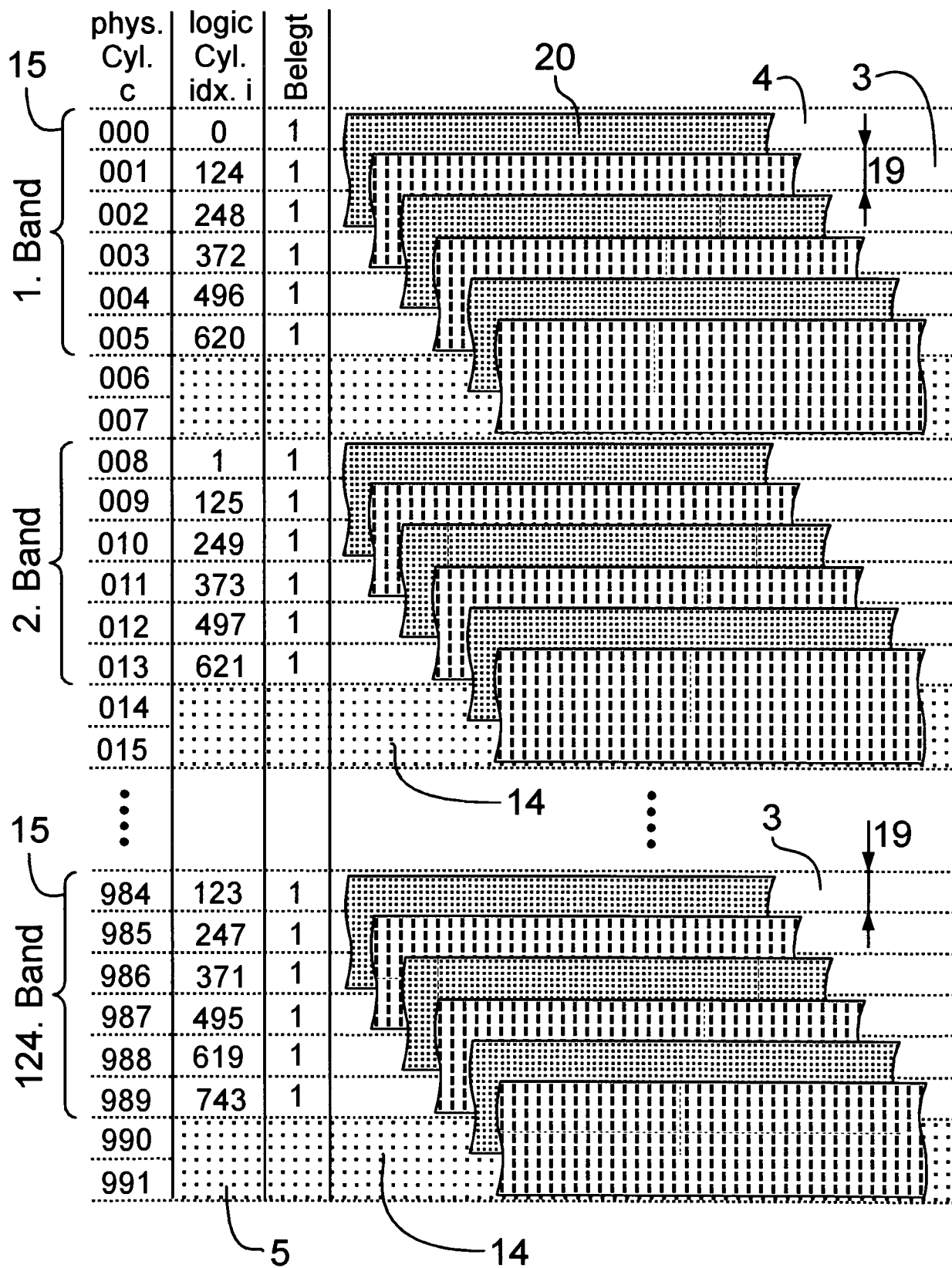


FIG. 21

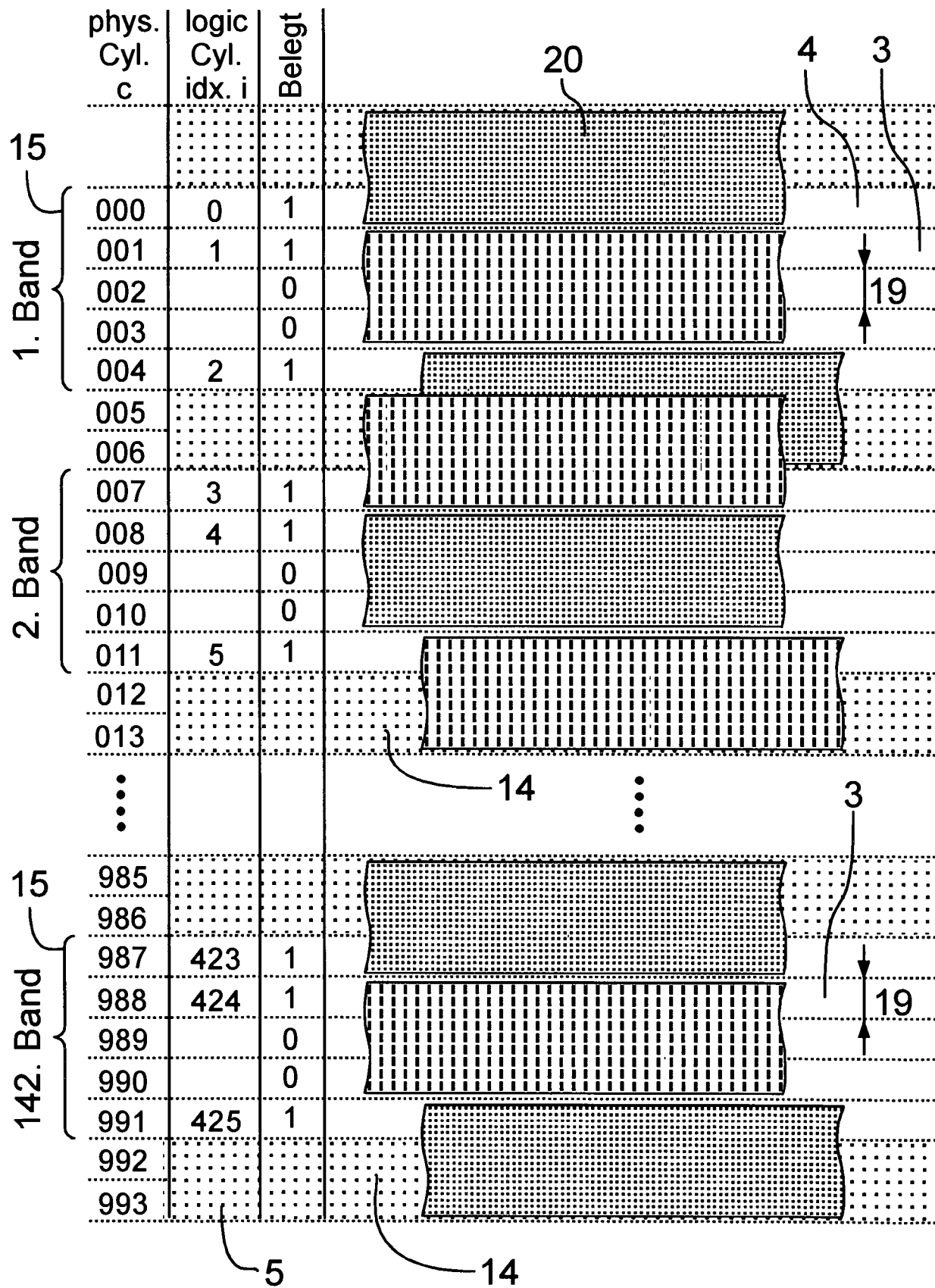


FIG. 22

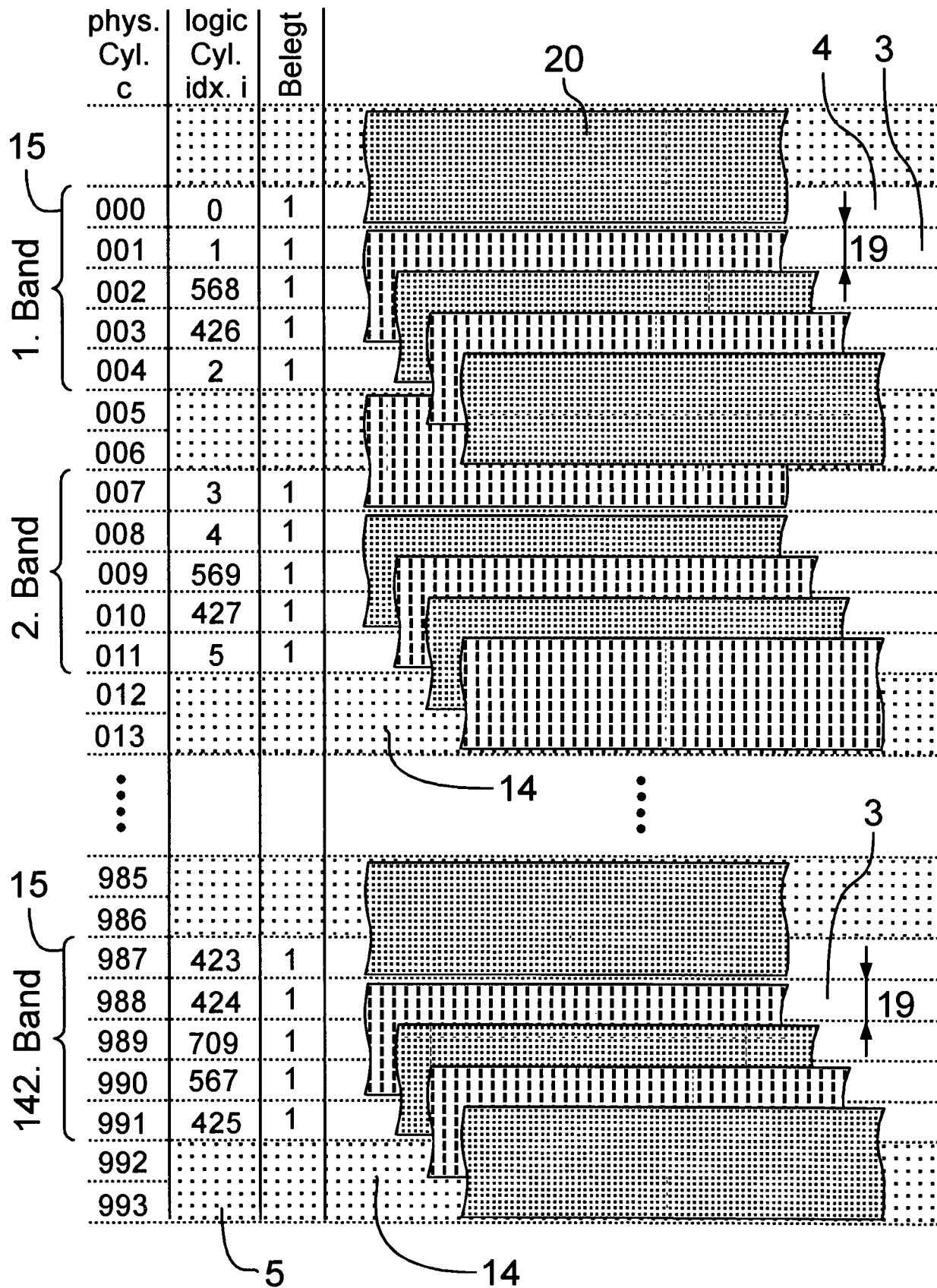


FIG. 23

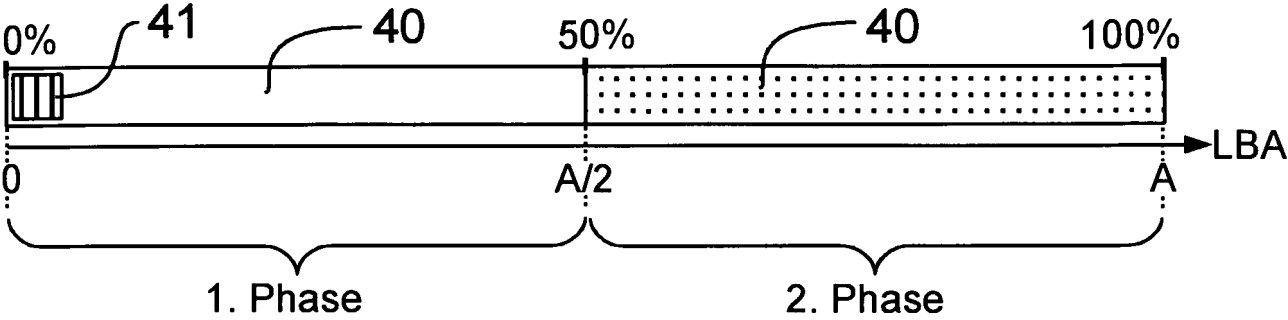


FIG. 24

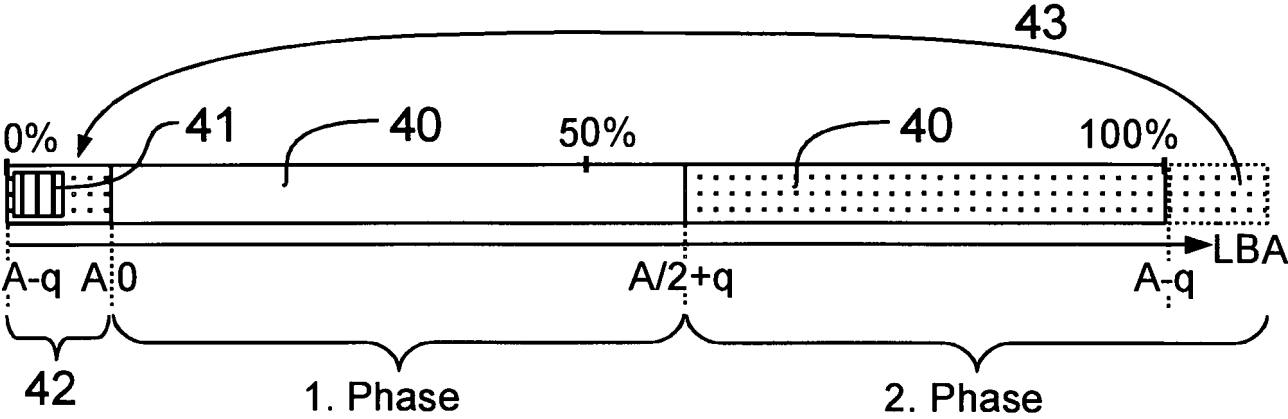


FIG. 25

	phys. Cyl. c	logic Cyl. idx. i	Belegt	
21	⋮	⋮	⋮	19
198. Band	985	394	0	3
	986	792	1	
	987			20
	988	793	1	
	989	395	0	14
	990	396	0	
	991	794	1	5
	992			
	993	795	1	
	994	397	0	

FIG. 26

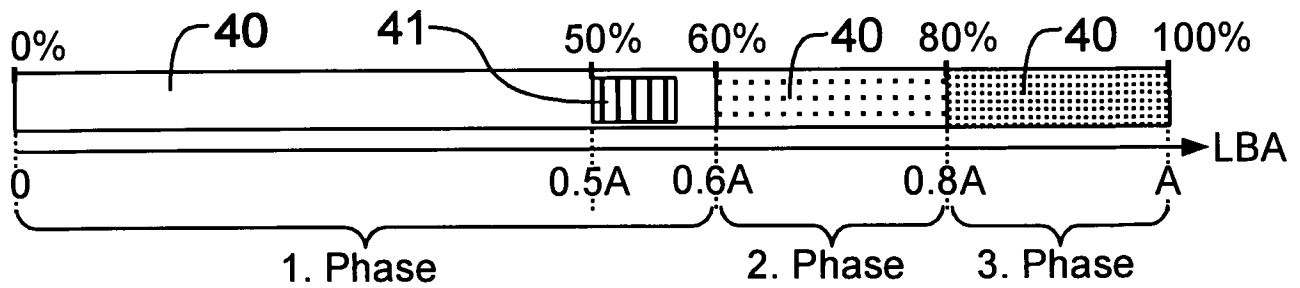


FIG. 27

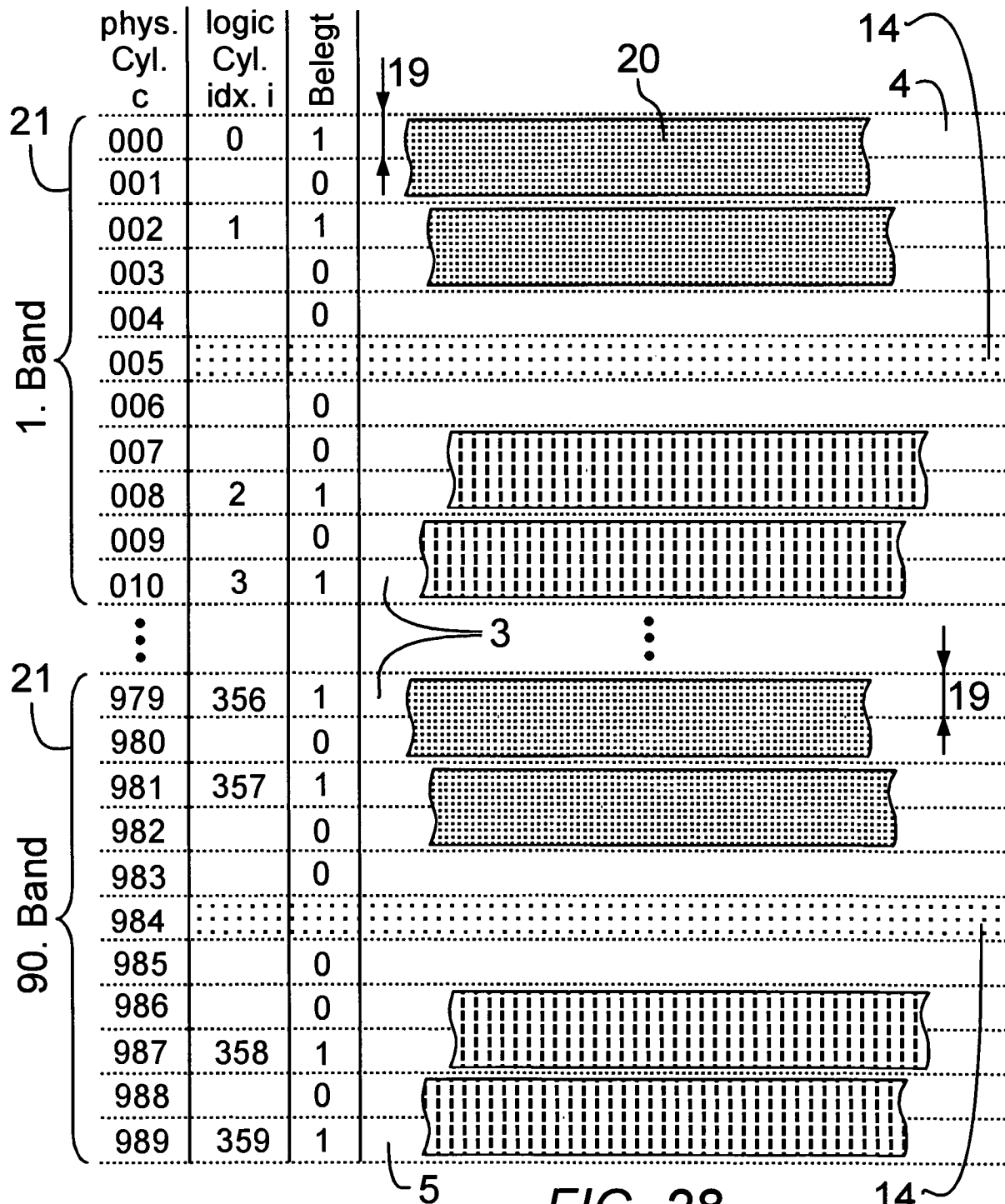


FIG. 28

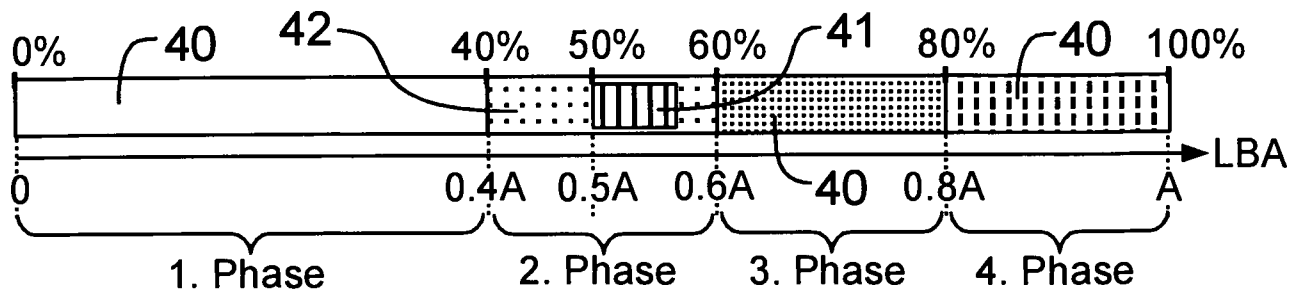


FIG. 29

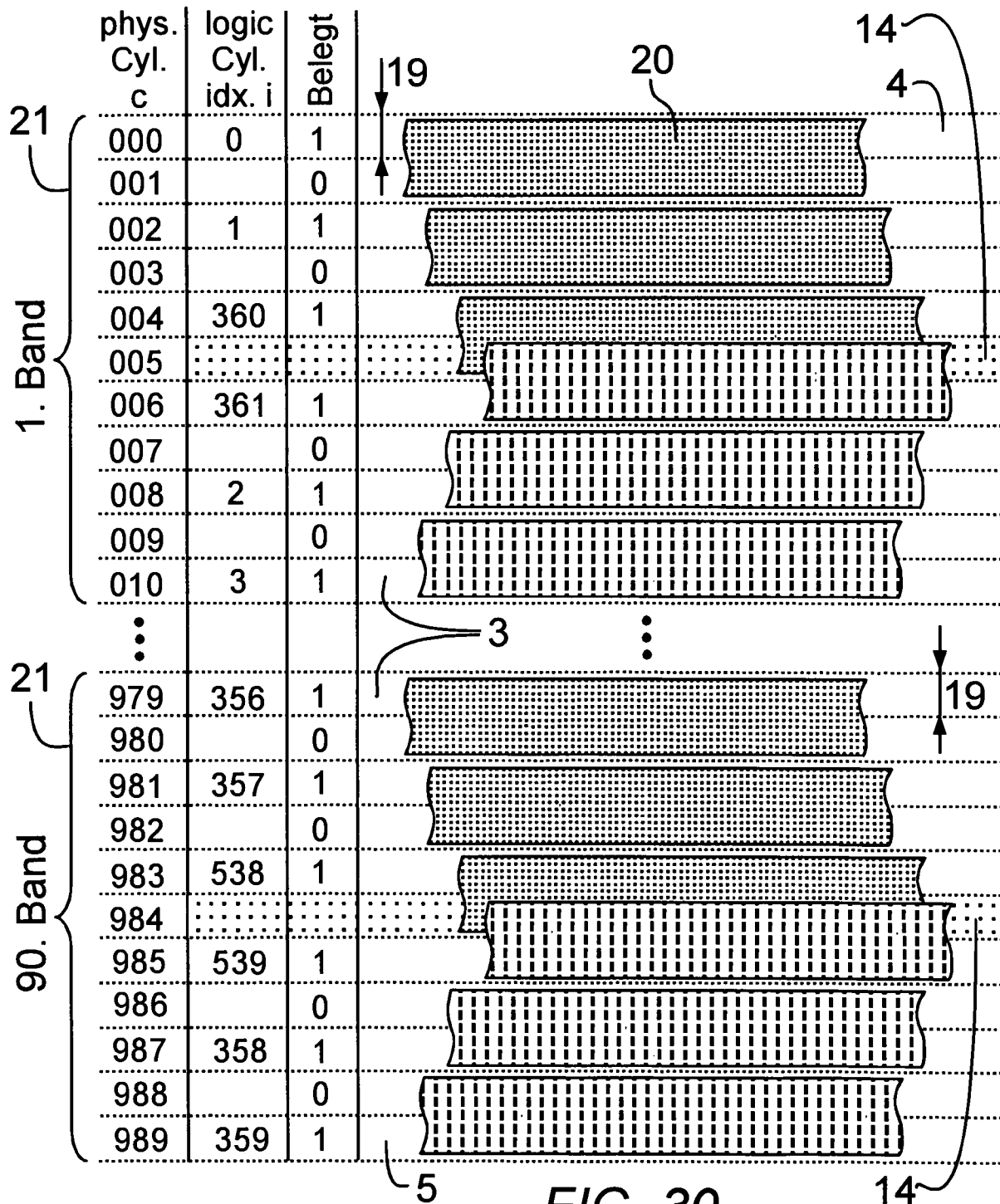


FIG. 30

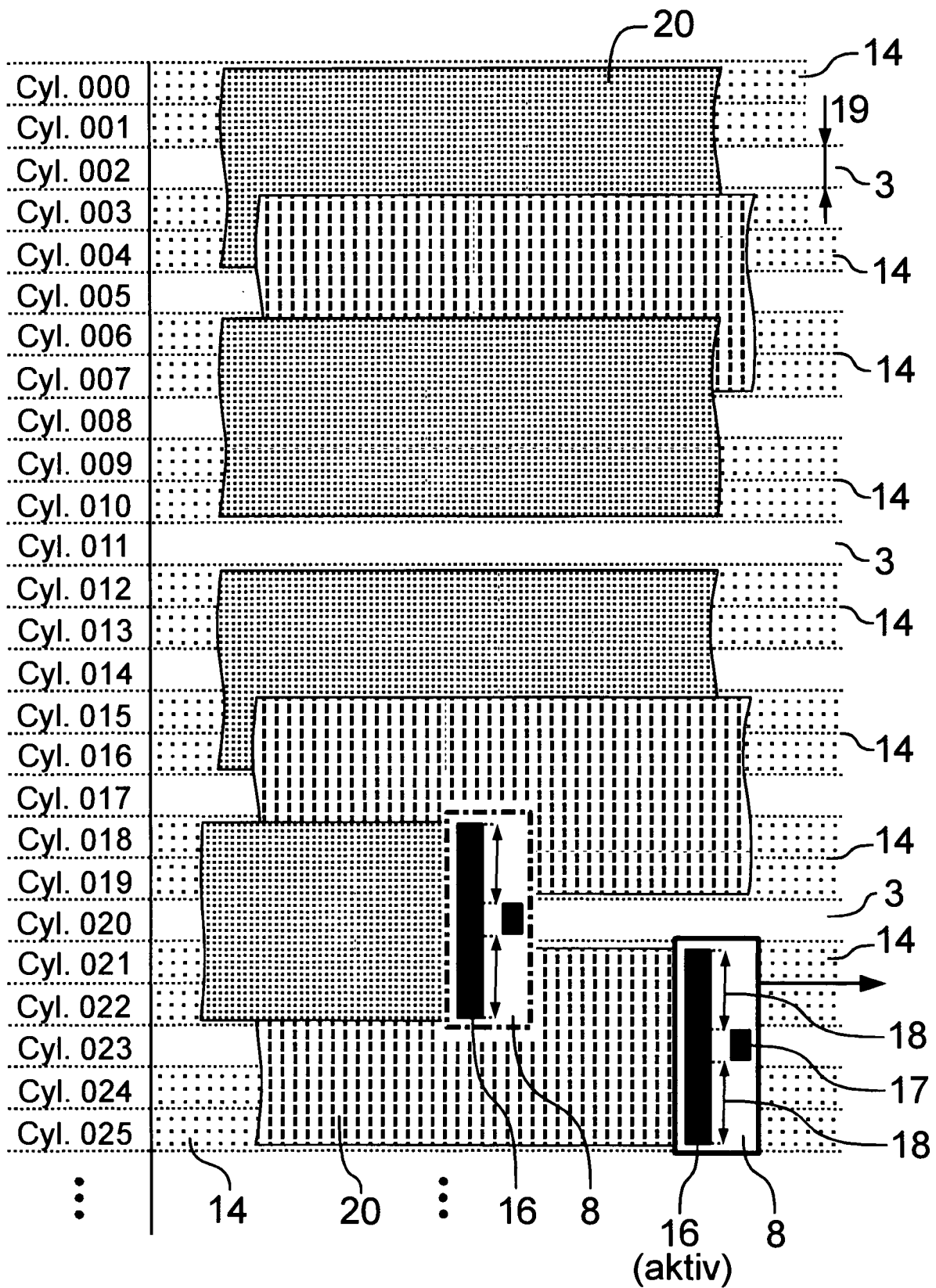


FIG. 31

	phys. Cyl. c	logic Cyl. idx. i	Config. (u, v)	Status	Belegt	
1. Band	000 (0)	0	(0,1)	0	1	
	001 (1)	398	(1,2)	0	0	
	002 (2)			2		
	003 (3)	399	(3,2)	4	0	
2. Band	004 (4)	1	(4,3)	4	1	
	005 (0)	2	(0,1)	0	1	
	006 (1)	400	(1,2)	1	1	
	007 (2)			1		
3. Band	008 (3)	401	(3,2)	4	0	
	009 (4)	3	(4,3)	4	1	
	010 (0)	4	(0,1)	0	1	
	011 (1)	402	(1,2)	0	0	
...	012 (2)			3		
	013 (3)	403	(3,2)	3	1	
	014 (4)	5	(4,3)	4	1	
199. Band	990 (0)	396	(0,1)	0	1	
	991 (1)	794	(1,2)	1	1	
	992 (2)			3		
	993 (3)	795	(3,2)	3	1	
	994 (4)	397	(4,3)	4	1	

FIG. 32

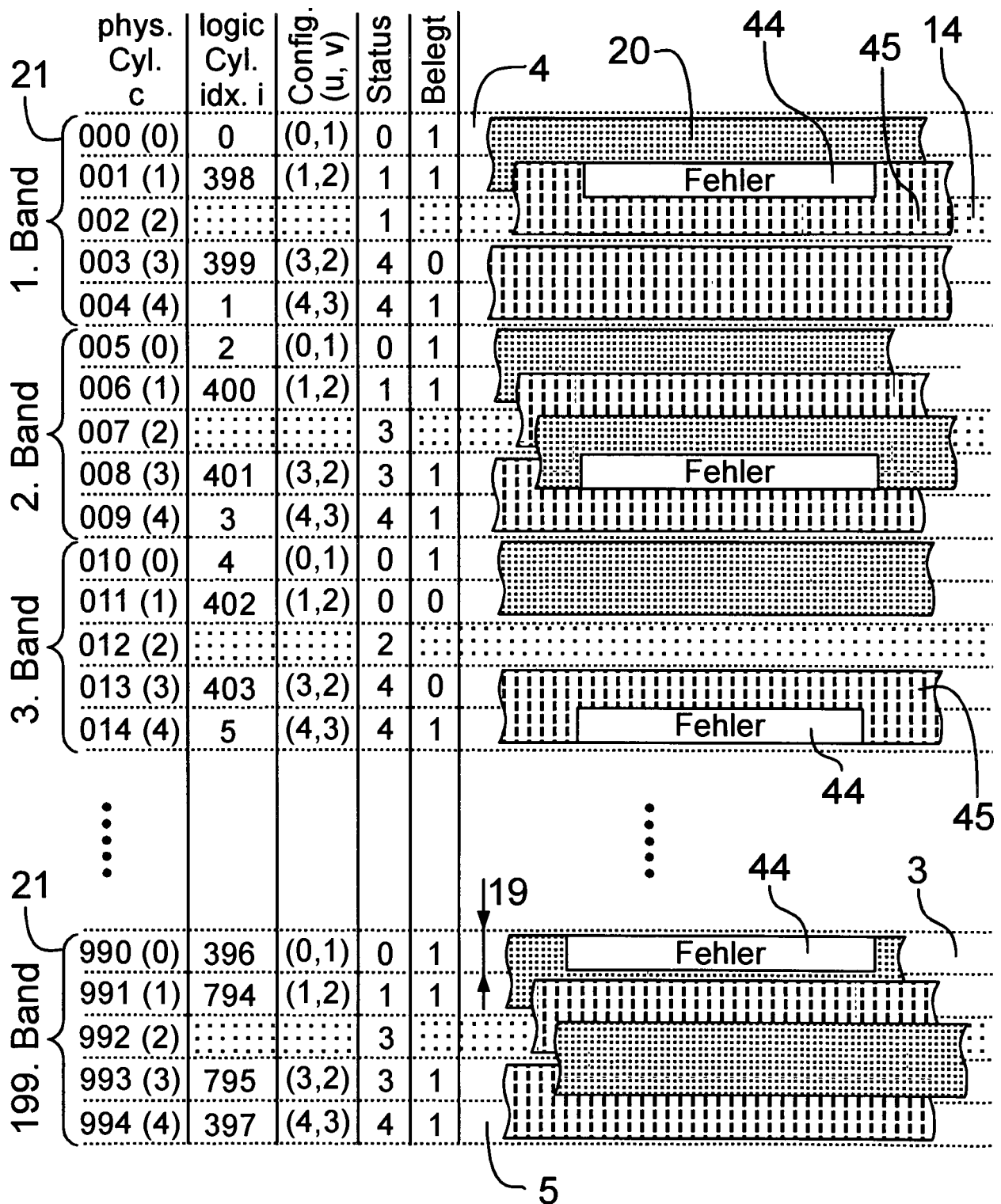


FIG. 33

	phys. Cyl. c	logic Cyl. idx. i	Config. (u, v)	Status	Belegt	
1. Band	000 (0)	0	(0,1)	0	1	
	001 (1)	398	(3,2)	0	...	
	002 (2)	...	...	3	0	
	003 (3)	399	(2,1)	3	1	
	004 (4)	1	(4,3)	4	1	
2. Band	005 (0)	2	(0,1)	0	1	
	006 (1)	400	(1,2)	1	1	
	007 (2)	...	...	2	1	
	008 (3)	401	(2,3)	2	...	
	009 (4)	3	(4,3)	4	1	
3. Band	010 (0)	4	(0,1)	0	1	
	011 (1)	402	(2,3)	1	1	
	012 (2)	...	...	1	0	
	013 (3)	403	(3,4)	3	0	
	014 (4)	5	(1,2)	4	...	
...	...	...	...	...	...	...
199. Band	990 (0)	396	(4,3)	1	...	
	991 (1)	794	(2,1)	1	1	
	992 (2)	...	...	2	1	
	993 (3)	795	(1,0)	3	1	
	994 (4)	397	(3,2)	4	1	

FIG. 34

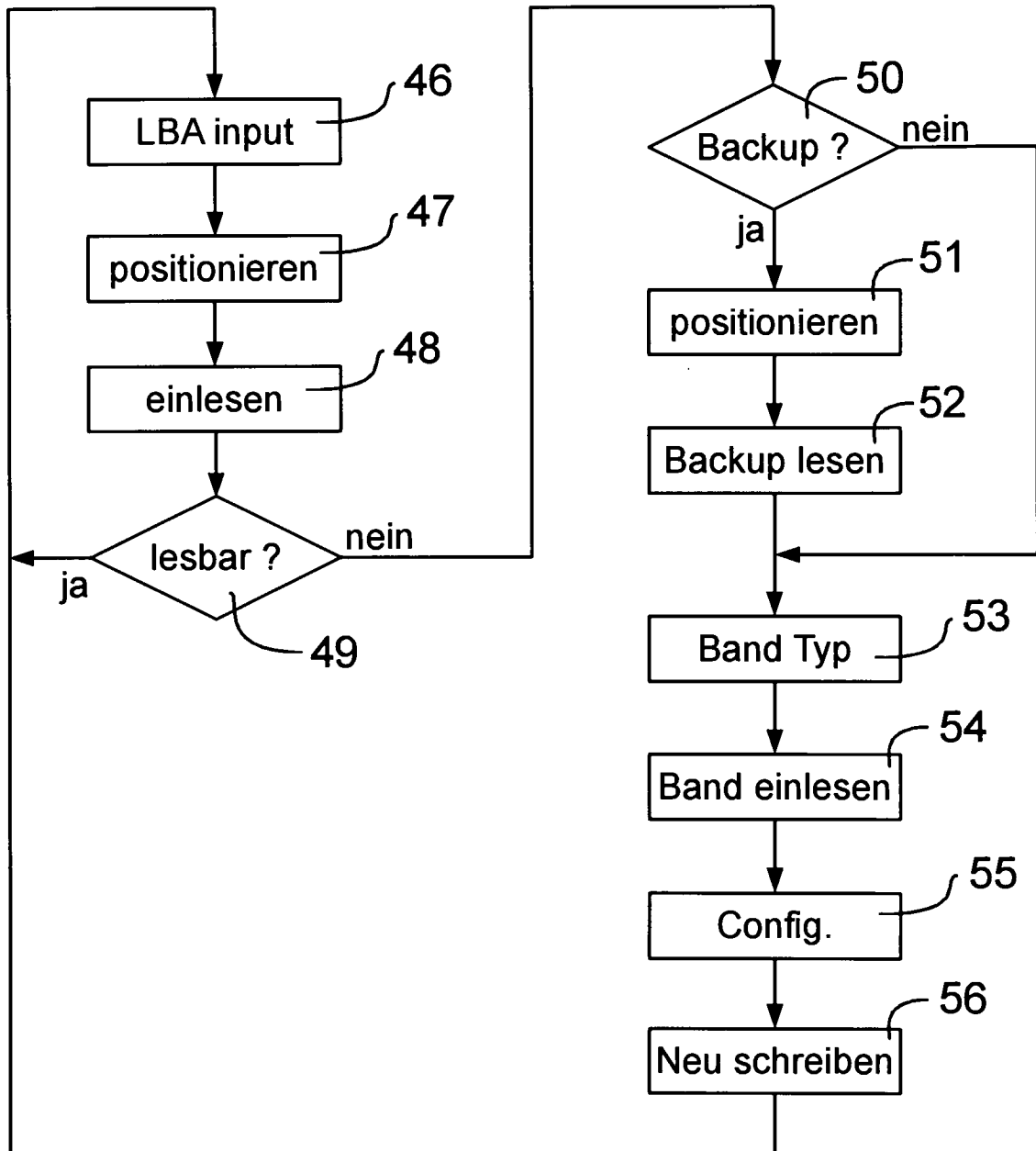


FIG. 35

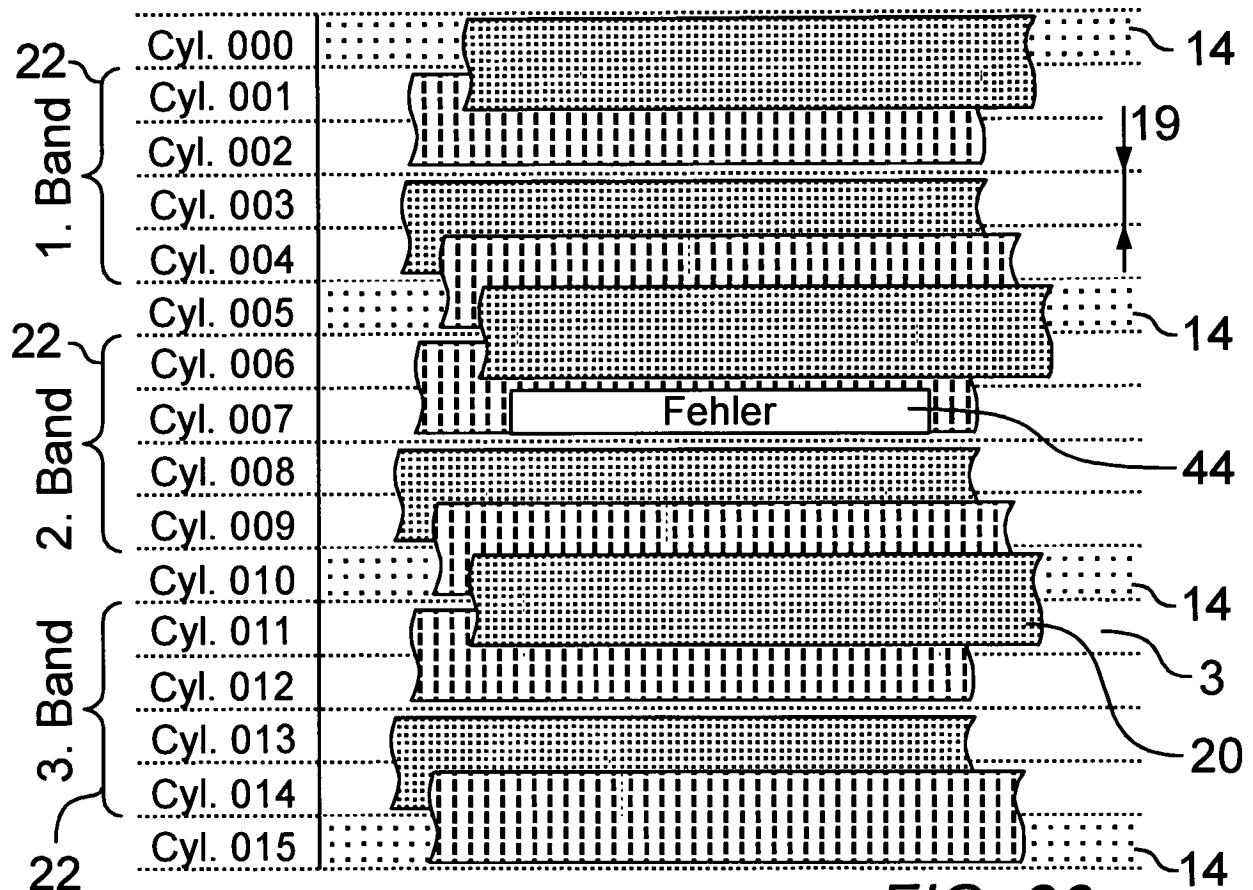


FIG. 36

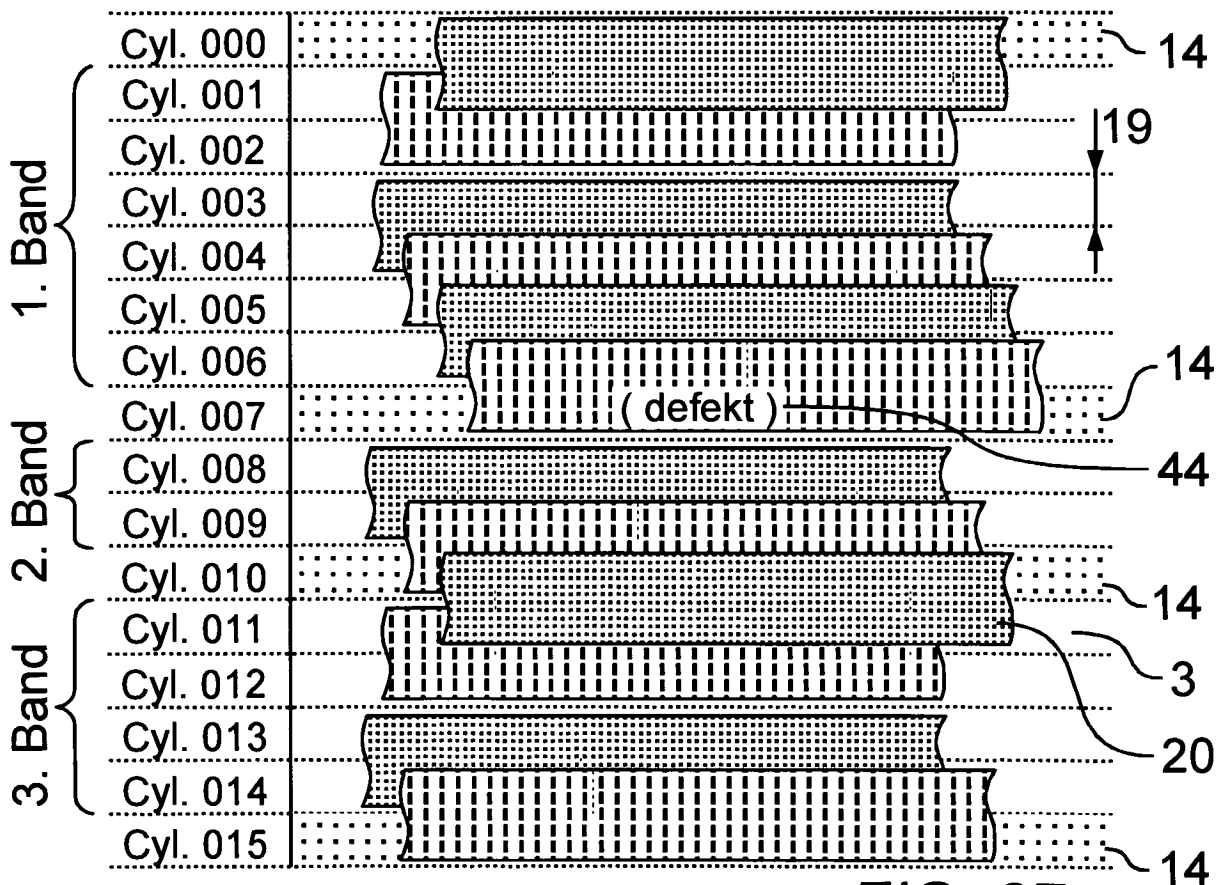


FIG. 37