

# Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

## Teil C – XIII. Dateisysteme

23. und 30. Januar 2025

Jürgen Kleinöder

(© Jürgen Kleinöder)



Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

## Agenda

Medien

Speicherung von Dateien

Freispeicherverwaltung

Beispiele: Dateisysteme unter UNIX und Windows

Dateisysteme mit Fehlererholung

Datensicherung

© jk SP (WS 2024/25)

1 Agenda C – XIII / 2

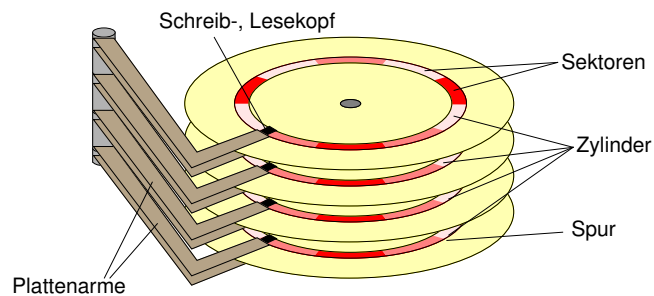
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

## Medien

### Festplatten (hard disk drive - HDD)

- Lange Zeit häufigstes Medium zum Speichern von Dateien

- Aufbau einer Festplatte



- Kopf schwebt auf Luft- oder Gaspolster (z. B. Helium)

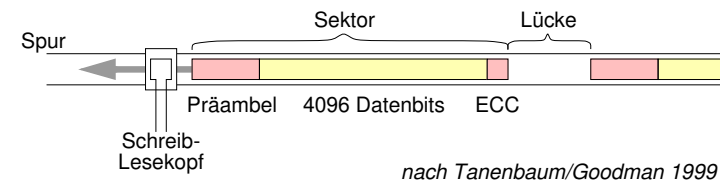
© jk SP (WS 2024/25)

2 Medien | 2.1 Festplatten (hard disk drive - HDD) C – XIII / 3

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

## Festplatten (2)

- Sektoraufbau



- Breite der Spur:  $0,2 \mu\text{m}$ , bei "Shingled Magnetic Recording" überlappende Spuren
- Spuren pro Zentimeter: ca. 10.000
- Bitdichte:  $34 \text{ Bit}/\mu\text{m}$

- Zonen

- Mehrere Zylinder (10–30) bilden eine Zone mit gleicher Sektorenanzahl (bessere Plattenausnutzung)

© jk SP (WS 2024/25)

2 Medien | 2.1 Festplatten (hard disk drive - HDD) C – XIII / 4

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

## HDD / SSD

- SSD (solid-state disk)
  - Nicht-flüchtiger Halbleiter-Speicher (Flash-Mem.), meist NAND-Chips
  - Schnittstelle zum Rechner kompatibel mit HDD
  - inzwischen erheblich höhere Kapazitäten als bei HDD möglich
  - erheblich schneller und robuster (keine Mechanik)
  - noch erheblich teurer (Faktor 4- 9)
- Zugriffsmerkmale
  - blockorientierter und wahlfreier Zugriff
  - Blockgröße zwischen 32 und 4096 Bytes (typisch 512 Bytes)
  - HDD: Zugriff erfordert Positionierung des Schwenkarms auf den richtigen Zylinder und Warten auf den entsprechenden Sektor
  - SSD: Lesen direkt und schnell, Schreiben nur blockweise und langsamer (Faktor 10), Blöcke müssen vorher explizit gelöscht worden sein
  - Interner Controller verbirgt die Hardware-Details, enthält Cache-Speicher, optimiert Zugriffe, Blöcke sind durchnummeriert

## HDD / SDD (2)

- Datenblätter von drei (alten) Beispielplatten

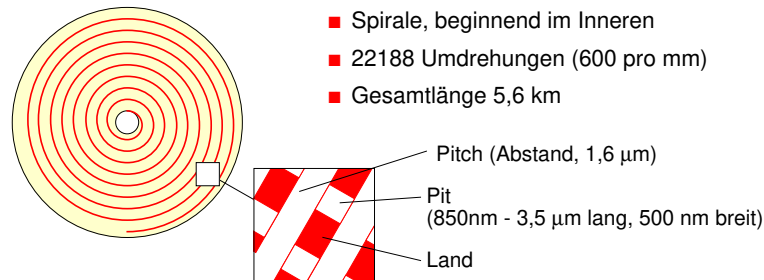
Plattentyp	Fujitsu M2344 (1987)	Seagate Cheetah	Seagate Barracuda
Kapazität	690 MB	300 GB	400 GB
Platten/Köpfe	8 / 28	4 / 8	781.422.768 Sektoren
Zylinderzahl	624	90.774	
Cache	-	4 MB	8 MB
Positionierzeiten	Spur zu Spur	4 ms	0,5 ms
	mittlere	16 ms	5,3 ms
	maximale	33 ms	10,3 ms
Transferrate	2,4 MB/s	320 MB/s	-150 MB/s
Rotationsgeschw.	3.600 U/min	10.000 U/min	7.200 U/min
eine Plattenumdrehung	16 ms	6 ms	8 ms
Stromaufnahme	?	16-18 W	12,8 W

01.2025: Kapazität bis 36TB bei 7.200 U/min oder 0,6 - 2 TB bei 15.000 U/min, Zugriffszeit ab 2 ms, Transferrate bis 550 MB/s

SSD: Kapazität bis 100 TB, Zugriffszeit ab. 0,03/0,3 ms, Transferrate bis 14 GB/s

## CD-ROM / DVD

- Aufbau einer CD



- Spirale, beginnend im Inneren
- 22188 Umdrehungen (600 pro mm)
- Gesamtlänge 5,6 km

- **Pit:** Vertiefung, wird von Laser (780 nm Wellenlänge) abgetastet

- DVD

- gleiches Grundkonzept, Wellenlänge des Lasers 650 nm
- Pits und Spurabstand weniger als halb so groß

## CD-ROM / DVD (2)

- Kodierung einer CD

- **Symbol:** ein Byte wird mit 14 Bits kodiert (kann bereits bis zu zwei Bitfehler korrigieren)
- **Frame:** 42 Symbole (192 Datenbits, 396 Fehlerkorrekturbits)
- **Sektor:** 98 Frames werden zusammengefasst (16 Bytes Präambel, 2048 Datenbytes, 288 Bytes Fehlerkorrektur)
- **Effizienz:** 7203 Bytes transportieren 2048 Nutzbytes (28,4 %)

- Kodierung einer DVD

- Codierung mit Reed-Solomon-Product-Code, 8/16-Bit-Modulation, 43,2 % Nutzdaten

- Transferrate

- CD-Single-Speed-Laufwerk: 75 Sektoren/Sek. (153.600 Bytes/Sek.)
- CD-72-fach-Laufwerk: 11,06 MB/Sek.
- DVD 1-fach: 1.3 MB/sec, 24-fach: 33.2 MB/sec

## CD-ROM / DVD (3)

- Kapazität
  - CD: ca. 650 MB
  - DVD single layer: 4.7 GB
  - DVD dual layer: 8.5 GB, beidseitig: 17 GB
- Varianten
  - **DVD/CD-R** (Recordable): einmal beschreibbar
  - **DVD/CD-RW** (Rewritable): mehrfach beschreibbar

## Speicherung von Dateien

- Dateien benötigen oft mehr als einen Block auf der Festplatte
  - Welche Blöcke werden für die Speicherung einer Datei verwendet?

### Kontinuierliche Speicherung

- Datei wird in Blöcken mit aufsteigenden Blocknummern gespeichert
  - Nummer des ersten Blocks und Anzahl der Folgeblöcke muss gespeichert werden
- ★ Vorteile
  - Zugriff auf alle Blöcke mit minimaler Positionierzeit des Schwenkarms
  - Schneller direkter Zugriff auf bestimmter Dateiposition
  - Einsatz z. B. bei Systemen mit Echtzeitanforderungen

## Kontinuierliche Speicherung (2)

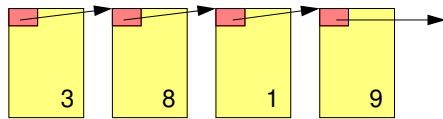
- ▲ Probleme
  - Finden des freien Platzes auf der Festplatte (Menge aufeinanderfolgender und freier Plattenblöcke)
  - Fragmentierungsproblem (Verschnitt: nicht nutzbare Plattenblöcke; siehe auch externer Verschnitt bei Speicherverwaltung)
  - Größe bei neuen Dateien oft nicht im Voraus bekannt
  - Erweitern ist problematisch
    - Umkopieren, falls kein freier angrenzender Block mehr verfügbar

## Kontinuierliche Speicherung (3)

- Variation
  - Unterteilen einer Datei in Folgen von Blöcken (*Chunks, Extents*)
  - Blockfolgen werden kontinuierlich gespeichert
  - Pro Datei muss erster Block und Länge jedes einzelnen Chunks gespeichert werden
- ▲ Problem
  - Verschnitt innerhalb einer Folge (siehe auch Speicherverwaltung: interner Verschnitt bei Seitenadressierung)

## Verkettete Speicherung

- Blöcke einer Datei sind verkettet



- z. B. Commodore Systeme (CBM 64 etc.)
  - Blockgröße 256 Bytes
  - die ersten zwei Bytes bezeichnen Spur- und Sektornummer des nächsten Blocks
  - wenn Spurnummer gleich Null: letzter Block
  - 254 Bytes Nutzdaten

- ★ Datei kann wachsen und verlängert werden

## Verkettete Speicherung (2)

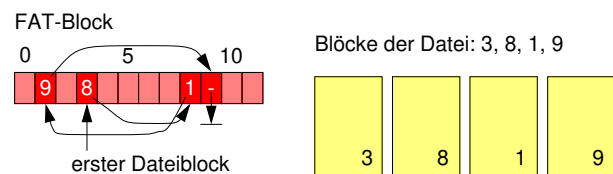
- ▲ Probleme

- Speicher für Verzeigerung geht von den Nutzdaten im Block ab (ungünstig im Zusammenhang mit Paging: Seite würde immer aus Teilen von zwei Plattenblöcken bestehen)
- Fehleranfälligkeit: Datei ist nicht restaurierbar wenn ein Fehler in der Verzeigerung entsteht
- schlechter direkter Zugriff auf bestimmte Dateiposition
- häufiges Positionieren des Schreib-Lesekopfs bei verstreuten Datenblöcken

## Verkettete Speicherung (3)

- Verkettung wird in speziellem Plattenblocks gespeichert

- FAT-Ansatz (*FAT: File Allocation Table*), z. B. MS-DOS, Windows 95



- Dateiverzeichnis enthält zu jeder Datei die Nummer des ersten Blocks

- ★ Vorteile

- kompletter Inhalt des Datenblocks ist nutzbar (günstig bei Paging)
- mehrfache Speicherung der FAT möglich: Einschränkung der Fehleranfälligkeit

## Verkettete Speicherung (4)

- ▲ Probleme

- mindestens ein zusätzlicher Block muss geladen werden (Caching der FAT zur Effizienzsteigerung nötig)
- FAT enthält Verkettungen für alle Dateien: das Laden der FAT-Blöcke lädt auch nicht benötigte Informationen
- aufwändige Suche nach dem zugehörigen Datenblock bei bekannter Position in der Datei
- häufiges Positionieren des Schreib-, Lesekopfs bei verstreuten Datenblöcken

## Indiziertes Speichern

- Spezieller Plattenblock enthält Blocknummern der Datenblöcke einer Datei

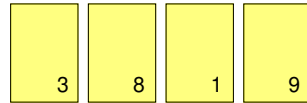
- entspricht eigener FAT pro Datei

Indexblock

3 8 1 9

↑  
erster Dateiblock

Blöcke der Datei: 3, 8, 1, 9

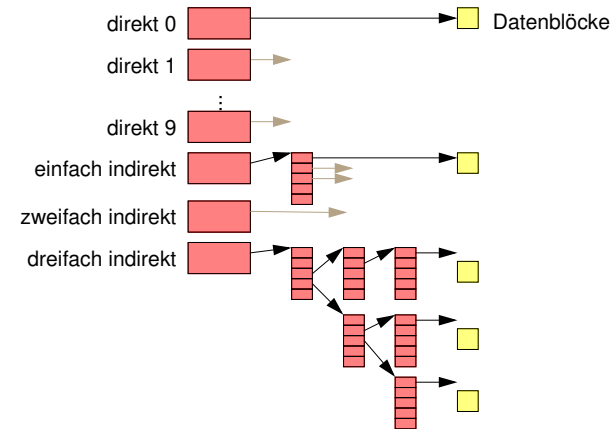


### ▲ Problem

- feste Anzahl von Blöcken im Indexblock
  - Verschnitt bei kleinen Dateien
  - Erweiterung nötig für große Dateien

## Indiziertes Speichern (2)

- Beispiel UNIX Inode

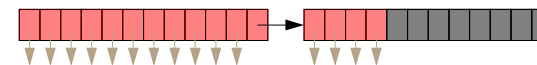


## Indiziertes Speichern (3)

- ★ Einsatz von mehreren Stufen der Indizierung
  - Inode benötigt sowieso einen Block auf der Platte (Verschnitt unproblematisch bei kleinen Dateien)
  - durch mehrere Stufen der Indizierung auch große Dateien adressierbar
- ▲ Nachteil
  - mehrere Blöcke müssen geladen werden (nur bei langen Dateien)

## Freispeicherverwaltung

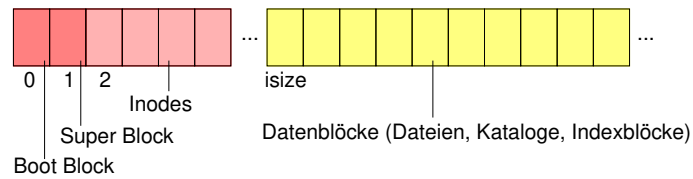
- Prinzipiell ähnlich wie Verwaltung von freiem Hauptspeicher
  - Bitvektoren zeigen für jeden Block Belegung an
  - verkettete Listen repräsentieren freie Blöcke
    - Verkettung kann in den freien Blöcken vorgenommen werden
    - Optimierung: aufeinanderfolgende Blöcke werden nicht einzeln aufgenommen, sondern als Stück verwaltet
    - Optimierung: ein freier Block enthält viele Blocknummern weiterer freier Blöcke und evtl. die Blocknummer eines weiteren Blocks mit den Nummern freier Blöcke



# Beispiel: UNIX Dateisysteme

## System V File System

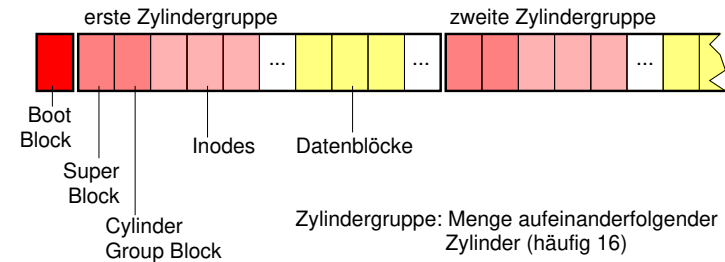
### Blockorganisation



- Boot Block enthält Informationen zum Laden eines initialen Programms
- Super Block enthält Verwaltungsinformation für ein Dateisystem
  - Anzahl der Blöcke, Anzahl der Inodes
  - Anzahl und Liste freier Blöcke und freier Inodes
  - Attribute (z.B. *Modified flag*)
- seit den 1970er Jahren in den ersten UNIX-Systemen eingesetzt

# BSD 4.2 (Berkeley Fast File System)

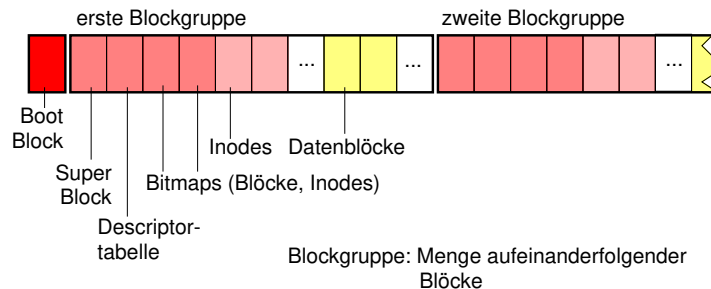
### Blockorganisation



- Kopie des Super Blocks in jeder Zylindergruppe
- freie Inodes u. freie Datenblöcke werden im *Cylinder Group Block* gehalten
- eine Datei wird möglichst innerhalb einer Zylindergruppe gespeichert
- ★ Vorteil: kürzere Positionierungszeiten
  - Optimierung der Zugriffszeiten. in den 1980er Jahren entwickelt

# Linux EXT2/3/4

### EXT2: Blockorganisation



- Ähnliches Layout wie BSD FFS
- Blockgruppen unabhängig von Zylindern
- EXT3: Erweiterung als Journaling-File-System (siehe Abschnitt 7.2)
- EXT4: Einführung von Extents (siehe NTFS) und viele neue Details

# Beispiel: Windows NTFS

### Dateisystem für Windows-Systeme (seit Windows NT 3.1, 1993)

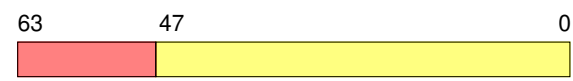
#### Datei

- beliebiger Inhalt; für das Betriebssystem ist der Inhalt transparent
- Rechte verknüpft mit NT-Benutzern und -Gruppen
- Datei kann automatisch komprimiert oder verschlüsselt gespeichert werden
- große Dateien bis zu  $2^{64}$  Bytes lang
- Hard links: mehrere Einträge derselben Datei in verschiedenen Katalogen möglich
- Dateiinhalt: Sammlung von *Streams*
  - *Stream*: einfache, unstrukturierte Folge von Bytes
  - "normaler Inhalt" = unbenannter Stream (default stream)
  - dynamisch erweiterbar
  - Syntax: dateiname:streamname

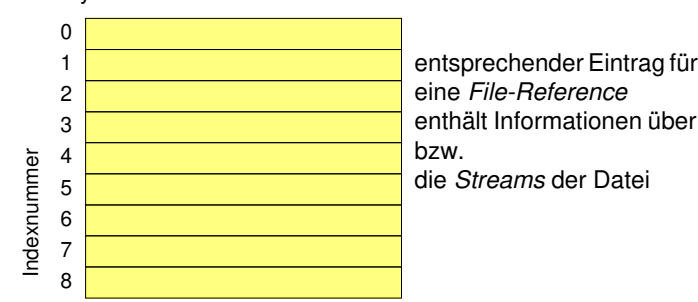
# Dateiverwaltung

- Basiseinheit „Cluster“
  - 512 Bytes bis 4 Kilobytes (beim Formatieren festgelegt)
  - wird auf eine Menge von hintereinanderfolgenden Blöcken abgebildet
  - logische Cluster-Nummer als Adresse (LCN)
- Basiseinheit „Strom“
  - jede Datei kann mehrere (Daten-)Ströme speichern
  - einer der Ströme wird für die eigentlichen Daten verwendet
  - Dateiname, MS-DOS Dateiname, Zugriffsrechte, Attribute und Zeitstempel werden jeweils in eigenen Datenströmen gespeichert (leichte Erweiterbarkeit des Systems)

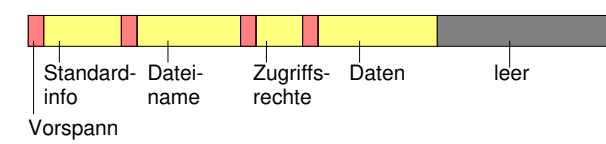
# Dateiverwaltung (2)

- *File-Reference*
    - Bezeichnet eindeutig eine Datei oder einen Katalog
- 
- 63                      47    0
- Sequenz-                      Dateinummer  
nummer
- Dateinummer ist Index in eine globale Tabelle (*MFT: Master File Table*)
  - Sequenznummer wird hochgezählt, für jede neue Datei mit gleicher Dateinummer

# Master-File-Table

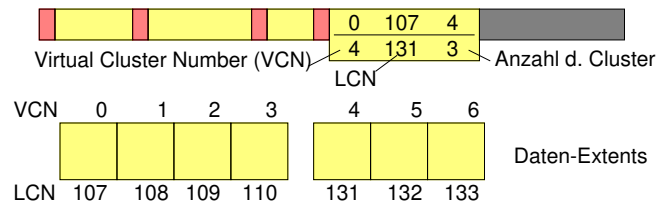
- Rückgrat des gesamten Systems
    - große Tabelle mit gleich langen Elementen (1KB, 2KB oder 4KB groß, je nach Clustergröße)
    - kann dynamisch erweitert werden
- 
- 0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
...
- entsprechender Eintrag für eine *File-Reference* enthält Informationen über bzw. die *Streams* der Datei
- Index in die Tabelle ist Teil der *File-Reference*

# Master-File-Table (2)

- Eintrag für eine kurze Datei
- 
- Standard-    Datei-    Zugriffs-    Daten    leer  
info            name            rechte
- Vorspann
- Streams
    - Standard-Information (immer in der MFT)
      - enthält Länge, Standard-Attribute, Zeitstempel, Anzahl der Hard links, Sequenznummer der gültigen File-Reference
    - Dateiname (immer in der MFT)
      - kann mehrfach vorkommen (Hard links)
    - Zugriffsrechte (*Security Descriptor*)
    - Eigentliche Daten

## Master-File-Table (3)

- Eintrag für eine längere Datei



- Extents** werden außerhalb der MFT in aufeinanderfolgenden Clustern gespeichert
- Lokalisierungsinformationen werden in einem eigenen Stream gespeichert

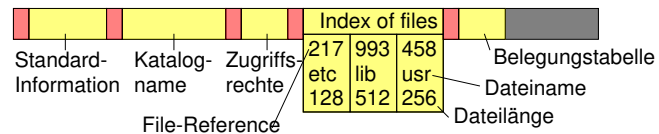
## Master-File-Table (4)

- Mögliche weitere Streams (*Attributes*)

- Index
  - Index über einen Attributsschlüssel (z.B. Dateinamen) implementiert Katalog
- Indexbelegungstabelle
  - Belegung der Struktur eines Index
- Attributliste (immer in der MFT)
  - wird benötigt, falls nicht alle Streams in einen MFT Eintrag passen
  - referenzieren weitere MFT Einträge und deren Inhalt
- Streams mit beliebigen Daten
  - wird gerne zum Verstecken von Viren genutzt, da viele Standard-Werkzeuge von Windows nicht auf die Bearbeitung mehrerer Streams eingestellt sind (arbeiten nur mit dem unbenannten Stream)

## Master File Table (5)

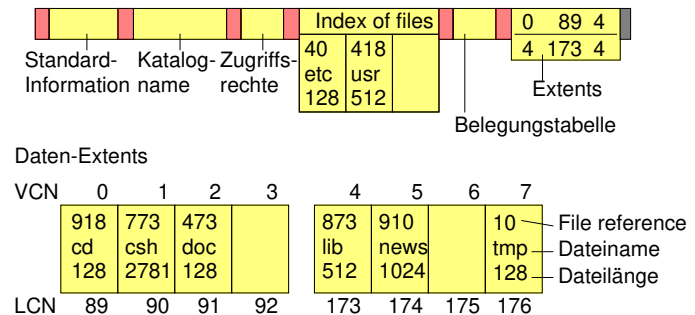
- Eintrag für einen kurzen Katalog



- Dateien des Katalogs werden mit File-References benannt
- Name und Standard-Attribute (z.B. Länge) der im Katalog enthaltenen Dateien und Kataloge werden auch im Index gespeichert (doppelter Aufwand beim Update; schnellerer Zugriff beim Kataloglisten)

## Master File Table (6)

- Eintrag für einen längeren Katalog



- Speicherung als B<sup>+</sup>-Baum (sortiert, schneller Zugriff)
- in einen Cluster passen zwischen 3 und 15 Dateien (im Bild nur eine)



## Metadaten (2)

- Alle Metadaten werden in Dateien gehalten

0	MFT	Feste Dateien in der MFT
1	MFT Kopie (teilweise)	
2	Log File	
3	Volume Information	
4	Attributtabelle	
5	Wurzelkatalog	
6	Clusterbelegungstabelle	
7	Boot File	
8	Bad Cluster File	
...		
16	Benutzerdateien u. -kataloge	
17		
...		

- Bedeutung der Metadateien

- MFT und MFT Kopie: MFT wird selbst als Datei gehalten (d.h. Cluster der MFT stehen im Eintrag 0)  
MFT Kopie enthält die ersten 16 Einträge der MFT (Fehlertoleranz)
- Log File: enthält protokollierte Änderungen am Dateisystem
- Volume Information: Name, Größe und ähnliche Attribute des Volumes
- Attributtabelle: definiert mögliche Ströme in den Einträgen
- Wurzelkatalog
- Clusterbelegungstabelle: Bitmap für jeden Cluster des Volumes
- Boot File: enthält initiales Programm zum Laden, sowie ersten Cluster der MFT
- Bad Cluster File: enthält alle nicht lesbaren Cluster der Platte  
NTFS markiert automatisch alle schlechten Cluster und versucht die Daten in einen anderen Cluster zu retten

## Fehlererholung

- NTFS ist ein Journaling-File-System
  - Änderungen an der MFT und an Dateien werden protokolliert.
  - Konsistenz der Daten und Metadaten kann nach einem Systemausfall durch Abgleich des Protokolls mit den Daten wieder hergestellt werden.
- ▲ Nachteile
  - etwas ineffizienter
  - nur für Volumes >400 MB geeignet

## Dateisysteme mit Fehlererholung

- Metadaten und aktuell genutzte Datenblöcke geöffneter Dateien werden im Hauptspeicher gehalten (Dateisystem-Cache)
  - effizienter Zugriff
  - Konsistenz zwischen Cache und Platte muss regelmäßig hergestellt werden
    - synchrone Änderungen: Operation kehrt erst zurück, wenn Änderungen auf der Platte gespeichert wurden
    - asynchrone Änderungen: Änderungen erfolgen nur im Cache, Operation kehrt danach sofort zurück, Synchronisation mit der Platte erfolgt später
- Mögliche Fehlerursachen
  - Stromausfall (oder dummer Benutzer schaltet einfach Rechner aus)
  - Systemabsturz

## Konsistenzprobleme

- Fehlerursachen & Auswirkungen auf das Dateisystem
  - Cache-Inhalte und aktuelle E/A-Operationen gehen verloren
  - inkonsistente Metadaten
    - z. B. Katalogeintrag fehlt zur Datei oder umgekehrt
    - z. B. Block ist benutzt aber nicht als belegt markiert
- ★ Reparaturprogramme
  - Programme wie **chkdsk**, **scandisk** oder **fsck** können inkonsistente Metadaten reparieren
- ▲ Datenverluste bei Reparatur möglich
- ▲ Große Platten bedeuten lange Laufzeiten der Reparaturprogramme

## Journaling-File-Systems

- Zusätzlich zum Schreiben der Daten und Meta-Daten (z. B. Inodes) wird ein Protokoll der Änderungen geführt
  - Grundidee: Log-based Recovery bei Datenbanken
  - alle Änderungen treten als Teil von Transaktionen auf.
  - Beispiele für Transaktionen:
    - Erzeugen, Löschen, Erweitern, Verkürzen von Dateien
    - Dateiattribute verändern
    - Datei umbenennen
  - Protokollieren aller Änderungen am Dateisystem zusätzlich in einer Protokolldatei (*Log File*)
  - beim Bootvorgang wird Protokolldatei mit den aktuellen Änderungen abgeglichen und damit werden Inkonsistenzen vermieden.

## Journaling-File-Systems (2)

- Protokollierung
  - für jeden Einzelvorgang einer Transaktion wird zunächst ein Logeintrag erzeugt und
  - danach die Änderung am Dateisystem vorgenommen
  - dabei gilt:
    - der Logeintrag wird immer **vor** der eigentlichen Änderung auf Platte geschrieben
    - wurde etwas auf Platte geändert, steht damit sicher auch der Protokolleintrag dazu auf der Platte
- Fehlererholung
  - Beim Bootvorgang wird überprüft, ob die protokollierten Änderungen vorhanden sind:
    - Transaktion kann wiederholt bzw. abgeschlossen werden (*Redo*) falls alle Logeinträge vorhanden
    - angefangene, aber nicht beendete Transaktionen werden rückgängig gemacht (*Undo*).

## Journaling-File-Systems (3)

- Beispiel: Löschen einer Datei im NTFS
  - Vorgänge der Transaktion
    - Beginn der Transaktion
    - Freigeben der Extents durch Löschen der entsprechenden Bits in der Belegungstabelle (gesetzte Bits kennzeichnen belegten Cluster)
    - Freigeben des MFT-Eintrags der Datei
    - Löschen des Katalogeintrags der Datei (evtl. Freigeben eines Extents aus dem Index)
    - Ende der Transaktion
  - Alle Vorgänge werden unter der File-Reference im Log-File protokolliert, danach jeweils durchgeführt.
    - Protokolleinträge enthalten Informationen zum *Redo* und zum *Undo*

## Journaling-File-Systems (4)

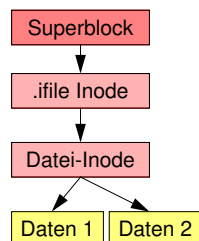
- Log vollständig (Ende der Transaktion wurde protokolliert und steht auf Platte):
  - *Redo* der Transaktion:  
alle Operationen werden wiederholt, falls nötig
- Log unvollständig (Ende der Transaktion steht nicht auf Platte):
  - *Undo* der Transaktion:  
in umgekehrter Reihenfolge werden alle Operation rückgängig gemacht
- Checkpoints
  - Log-File kann nicht beliebig groß werden
  - gelegentlich wird für einen konsistenten Zustand auf Platte gesorgt (*Checkpoint*) und dieser Zustand protokolliert (alle Protokolleinträge von vorher können gelöscht werden)

## Journaling-File-Systems (5)

- ★ Ergebnis
  - eine Transaktion ist entweder vollständig durchgeführt oder gar nicht
  - Nutzer können ebenfalls Transaktionen über mehrere Dateizugriffe definieren, wenn diese ebenfalls im Log erfasst werden
  - keine inkonsistenten Metadaten möglich
  - Hochfahren eines abgestürzten Systems benötigt nur den relativ kurzen Durchgang durch das Log-File.
    - Alternative **chkdsk** benötigt viel Zeit bei großen Platten
- ▲ Nachteile
  - etwas langsamer, da zusätzlich Log-File-Einträge geschrieben werden müssen
- Beispiele: NTFS, EXT3, EXT4, ReiserFS

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

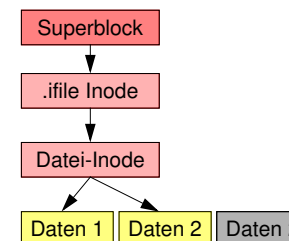
- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

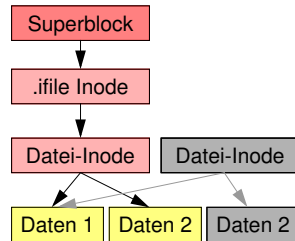
- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

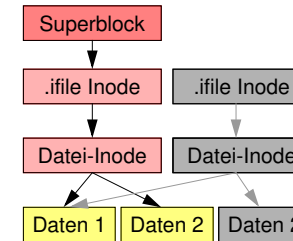
- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

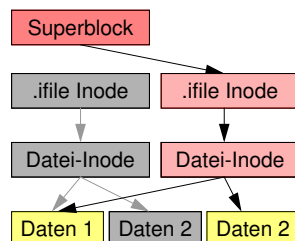
- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

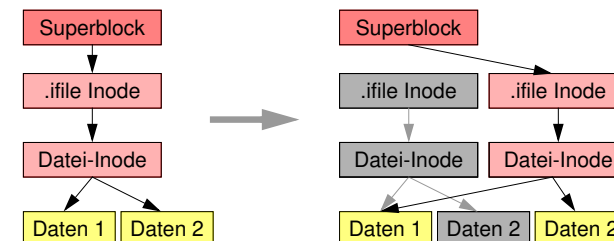
- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems

- Alternatives Konzept zur Realisierung von atomaren Änderungen
- Alle Änderungen im Dateisystem erfolgen auf Kopien
  - Der Inhalt veränderter Blöcke wird in neue Blöcke geschrieben



- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger statischer Block (Anker im System)

## Copy-on-Write- / Log-Structured-File-Systems (2)

- ★ Vorteile
  - Gute Schreibeffizienz - vor allem bei Log-Structured-File-Systems
  - Datenkonsistenz bei Systemausfällen
    - eine atomare Aktion macht alle zusammengehörigen Änderungen sichtbar
  - Schnappschüsse / Checkpoints einfach realisierbar
- ▲ Nachteile
  - Erzeugt starke Fragmentierung, die sich beim Lesen auswirken kann
    - ↳ Performanz nur akzeptabel, wenn Lesen primär aus Cache erfolgen kann oder Positionierzeiten keine Rolle spielen (SSD)
- Unterschied zwischen Copy-on-Write- und Log-Structured-File-Systems
  - Log-Structured-File-Systems schreiben kontinuierlich an das Ende des belegten Plattenbereichs und geben vorne die Blöcke wieder frei (kontinuierlicher Log)
  - Beispiele: Log-Structured: LinLogFS, BSD LFS  
Copy-on-Write: ZFS, Btrfs (Oracle)

## Fehlerhafte Plattenblöcke

- Blöcke, die beim Lesen Fehlermeldungen erzeugen
  - z.B. Prüfsummenfehler
- Hardwarelösung
  - Platte und Plattencontroller bemerken selbst fehlerhafte Blöcke und maskieren diese aus
  - Zugriff auf den Block wird vom Controller automatisch auf einen „gesunden“ Block umgeleitet
- Softwarelösung
  - File-System bemerkt fehlerhafte Blöcke und markiert diese auch als belegt

## Datensicherung

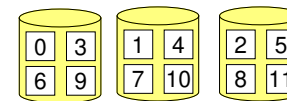
- Schutz vor dem Totalausfall von Platten
  - z. B. durch Head-Crash oder andere Fehler

### Sichern der Daten auf Tertiärspeicher

- ▶ Bänder, Bandroboter mit vorgelagertem Platten-Cache
- ▶ WORM-Speicherplatten (*Write Once Read Many*)
- Sichern großer Datenbestände
  - Total-Backups benötigen lange Zeit
  - Inkrementelle Backups sichern nur Änderungen ab einem bestimmten Zeitpunkt
  - Mischen von Total-Backups mit inkrementellen Backups
  - Incremental-forever Techniken mit Konsolidierung der Versionen im Backup-System
  - Backup auf Datei-Ebene oder auf Block-Ebene

## Einsatz mehrerer (redundanter) Platten

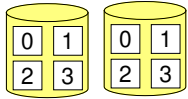
- Gestreifte Platten (*Striping*; RAID 0)
  - Daten werden über mehrere Platten gespeichert



- Datentransfers sind nun schneller, da mehrere Platten gleichzeitig angesprochen werden können
- ▲ Nachteil
  - keinerlei Datensicherung: Ausfall einer Platte lässt Gesamtsystem ausfallen

## Einsatz mehrerer redundanter Platten (2)

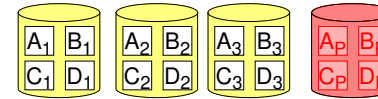
- Gespiegelte Platten (*Mirroring*; RAID 1)
  - Daten werden auf zwei Platten gleichzeitig gespeichert



- Implementierung durch Software (File-System, Plattentreiber) oder Hardware (spez. Controller)
- eine Platte kann ausfallen
- schnelleres Lesen (da zwei Platten unabhängig voneinander beauftragt werden können)
- ▲ Nachteil
  - doppelter Speicherbedarf
- wenig langsames Schreiben durch Warten auf zwei Plattentransfers
- Verknüpfung von RAID 0 und 1 möglich (RAID 0+1)

## Einsatz mehrerer redundanter Platten (3)

- Paritätsplatte (RAID 4)
  - Daten werden über mehrere Platten gespeichert, eine Platte enthält Parität



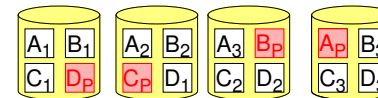
- Paritätsblock enthält byteweise XOR-Verknüpfungen von den zugehörigen Blöcken aus den anderen Streifen
- eine Platte kann ausfallen
- schnelles Lesen
- prinzipiell beliebige Plattenanzahl (ab drei)

## Einsatz mehrerer redundanter Platten (4)

- ▲ Nachteil von RAID 4
  - jeder Schreibvorgang erfordert auch das Schreiben des Paritätsblocks
  - Erzeugung des Paritätsblocks durch Speichern des vorherigen Blockinhalts möglich:  $P_{neu} = P_{alt} \oplus B_{alt} \oplus B_{neu}$  (P=Parity, B=Block)
  - Schreiben eines kompletten Streifens benötigt nur einmaliges Schreiben des Paritätsblocks
  - Paritätsplatte ist hoch belastet

## Einsatz mehrerer redundanter Platten (5)

- Verstreuter Paritätsblock (RAID 5)
  - Paritätsblock wird über alle Platten verstreut



- zusätzliche Belastung durch Schreiben des Paritätsblocks wird auf alle Platten verteilt
- heute gängigstes Verfahren redundanter Platten
- Vor- und Nachteile sonst wie RAID 4

- Doppelte Paritätsblöcke (RAID 6)
  - ähnlich zu RAID 5, aber zwei Paritätsblöcke (verkräftet damit den Ausfall von bis zu zwei Festplatten)
  - wichtig bei sehr großen, intensiv genutzten RAID-Systemen, wenn die Wiederherstellung der Paritätsinformation nach einem Plattenausfall lange dauern kann