

Systemprogrammierung

Grundlage von Betriebssystemen

Teil C – XIII. Dateisysteme

Jürgen Kleinöder

26. Januar 2021
2. Februar 2021



Agenda

Medien

Speicherung von Dateien

Freispeicherverwaltung

Beispiele: Dateisysteme unter UNIX und Windows

Dateisysteme mit Fehlererholung

Datensicherung

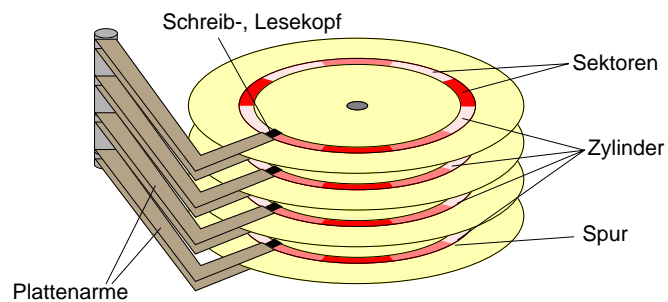


Medien

Festplatten (hard disk drive - HDD)

■ Lange Zeit häufigstes Medium zum Speichern von Dateien

■ Aufbau einer Festplatte

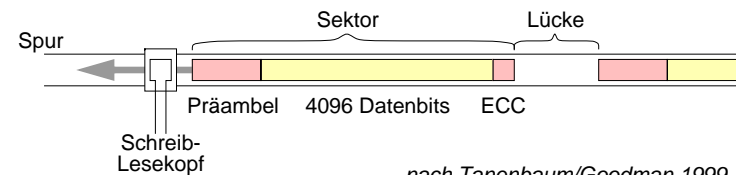


■ Kopf schwebt auf Luftpolster



Festplatten (2)

■ Sektoraufbau



■ Breite der Spur: 0,2 μm ,
bei "Shingled Magnetic Recording" überlappende Spuren

■ Spuren pro Zentimeter: ca. 10.000

■ Bitdichte: 34 Bit/ μm

■ Zonen

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



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 2 - 4)
- **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 werden sein
 - Interner Controller verbirgt die Hardware-Details, enthält Cache-Speicher, optimiert Zugriffe, Blöcke sind durchnummeriert



HDD / SSD (2)

- **Datenblätter von drei (alten) Beispielpplatten**

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

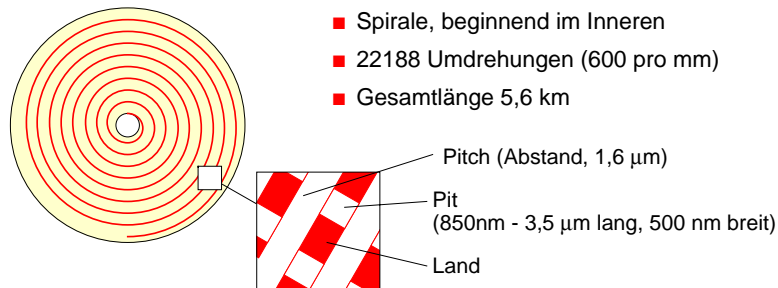
12.2020: Kapazität bis 20TB bei 7.200 U/min oder 0,6 - 2 TB bei 15.000 U/min, Zugriffszeit ab 2 ms, Transferrate bis 315 MB/s

SSD: Kapazität bis 100 TB, Zugriffszeit ab. 0,03/0,3 ms, Transferrate bis 4 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 Spurbabstand 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



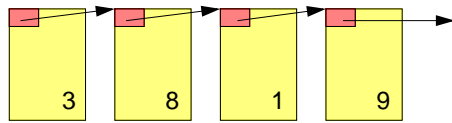
Kontinuierliche Speicherung (3)

- 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

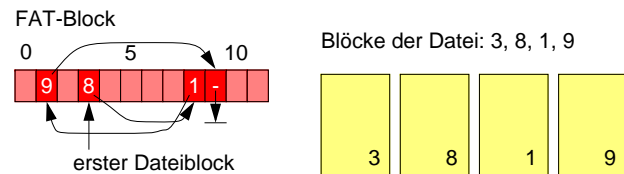
- Speicher für Verzeigerung geht von den Nutzdaten im Block ab (ungünstig im Zusammenhang mit Paging: Seite würde immer aus Teilen von zwei Plattenblöcken bestehen)
- Fehleranfälligkeit: Datei ist nicht restaurierbar wenn ein Fehler in der Verzeigerung entsteht
- schlechter direkter Zugriff auf bestimmte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

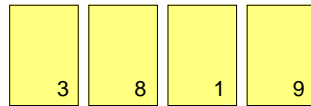
- entspricht eigener FAT pro Datei

Indexblock

Blöcke der Datei: 3, 8, 1, 9



erster Dateiblock



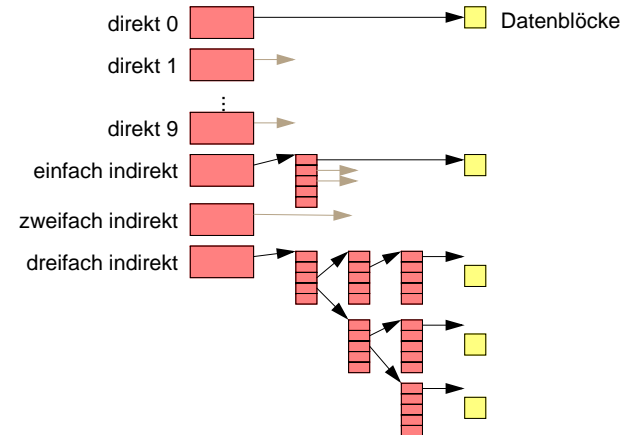
▲ Problem

- 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

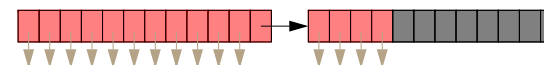
- mehrere Blöcke müssen geladen werden (nur bei langen Dateien)



Freispeicherverwaltung

- Prinzipiell ähnlich wie Verwaltung von freiem Hauptspeicher

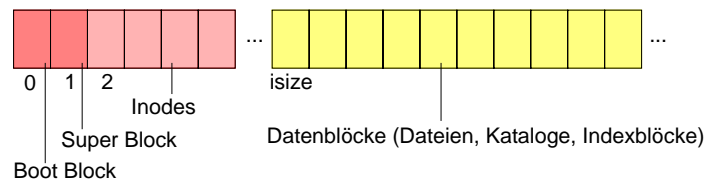
- Bitvektoren zeigen für jeden Block Belegung an
- verkettete Listen repräsentieren freie Blöcke
 - Verkettung kann in den freien Blöcken vorgenommen werden
 - Optimierung: aufeinanderfolgende Blöcke werden nicht einzeln aufgenommen, sondern als Stück verwaltet
 - Optimierung: ein freier Block enthält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



Beispiel: UNIX Dateisysteme

System V File System

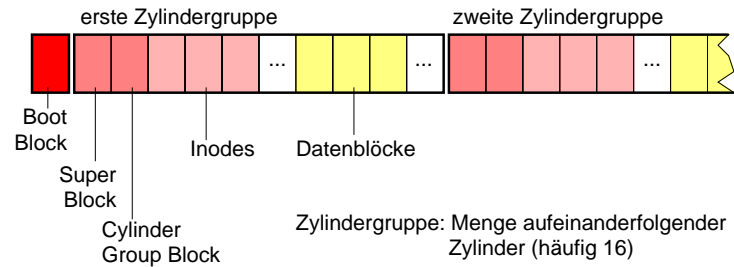
Blockorganisation



- 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)

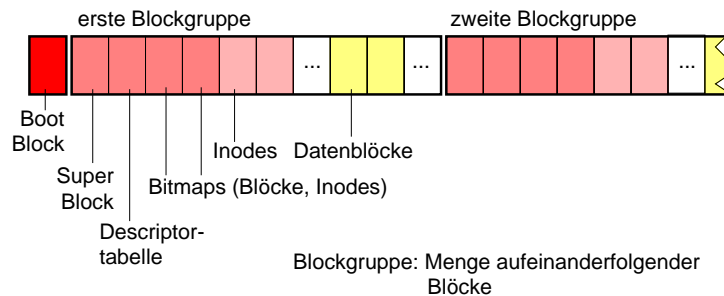
Blockorganisation



- 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

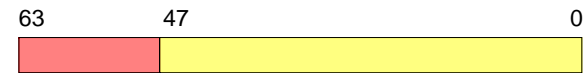
Dateiverwaltung

- 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



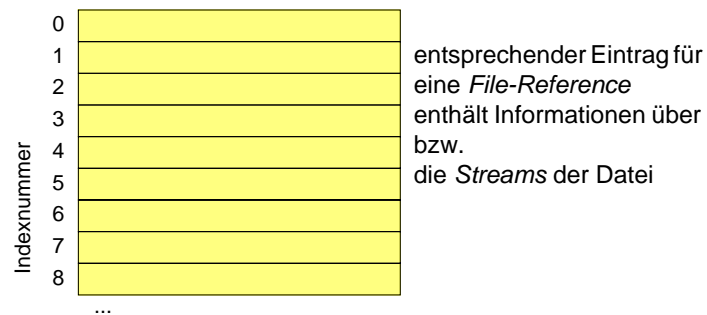
Sequenz-
nummer Dateinummer

- 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

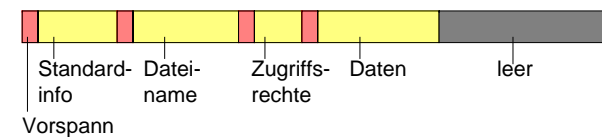


- Index in die Tabelle ist Teil der *File-Reference*



Master-File-Table (2)

- Eintrag für eine kurze Datei

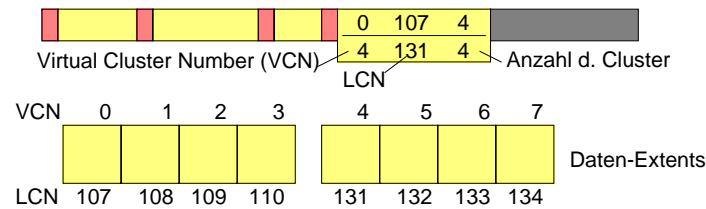


- Streams
 - Standard-Information (immer in der MFT)
 - enthält Länge, Standard-Attribute, Zeitstempel, Anzahl der Hard links, Sequenznummer der gültigen File-Reference
 - Dateiname (immer in der MFT)
 - kann mehrfach vorkommen (Hard links)
 - Zugriffsrechte (*Security Descriptor*)
 - Eigentliche Daten



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

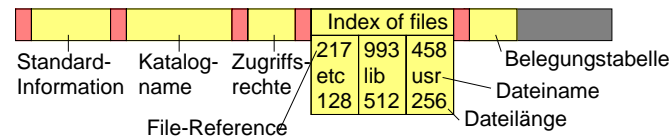
Master-File-Table (4)

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)

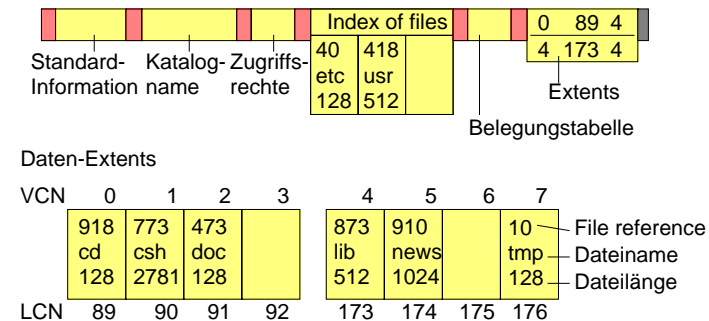
Eintrag für einen kurzen Katalog



- 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⁺-Baum (sortiert, schneller Zugriff)
- in einen Cluster passen zwischen 3 und 15 Dateien (im Bild nur eine)

Metadaten

- Alle Metadaten werden in Dateien gehalten

		Feste Dateien in der MFT
0	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		
...		



Metadaten (2)

- 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)



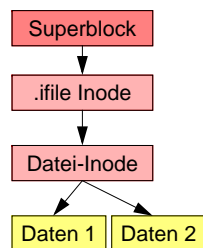
Journaling-File-Systems (5)

- ★ 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 einen neuen Block geschrieben

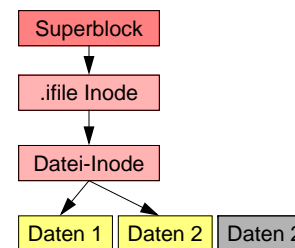


- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block



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 einen neuen Block geschrieben

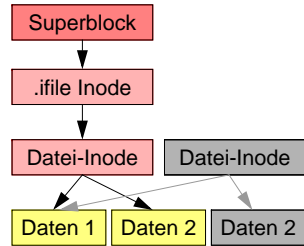


- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block



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 einen neuen Block geschrieben

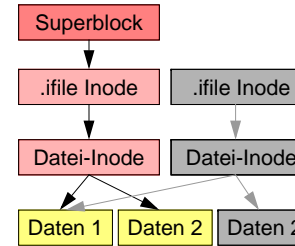


- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block



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 einen neuen Block geschrieben

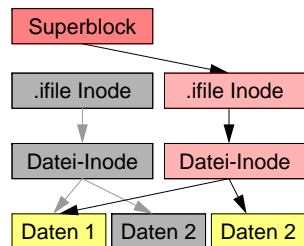


- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block



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 einen neuen Block geschrieben

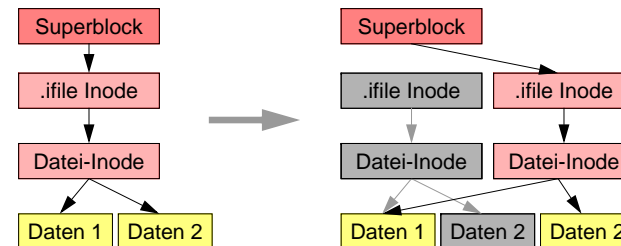


- Beispiel LinLogFS: Superblock einziger nicht ersetzter Block



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 einen neuen Block 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
 - ein atomare Änderung 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 vorgelagerter 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



Einsatz mehrerer (redundanter) Platten

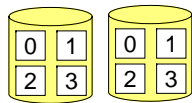
- Gestreifte Platten (*Striping*; RAID 0)
 - Daten werden über mehrere Platten gespeichert
-
- Datentransfers sind nun schneller, da mehrere Platten gleichzeitig angesprochen werden können
- ▲ Nachteil
 - keinerlei Datensicherung: Ausfall einer Platte lässt Gesamtsystem ausfallen



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)

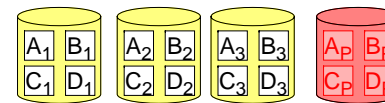
▲ Nachteil

- 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)

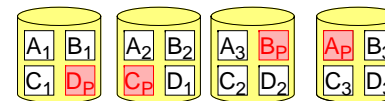
▲ Nachteil von RAID 4

- 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