
Betriebssysteme (BS)

11. Dateisysteme

<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ss25/bs>

30.06.2025

Peter Ulbrich

peter.ulbrich@tu-dortmund.de
bs-problems@ls12.cs.tu-dortmund.de
<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/kummerkasten>

In Teilen basierend auf *Betriebssysteme* von Olaf Spinczyk, Universität Osnabrück

Wiederholung: Betriebsmittel

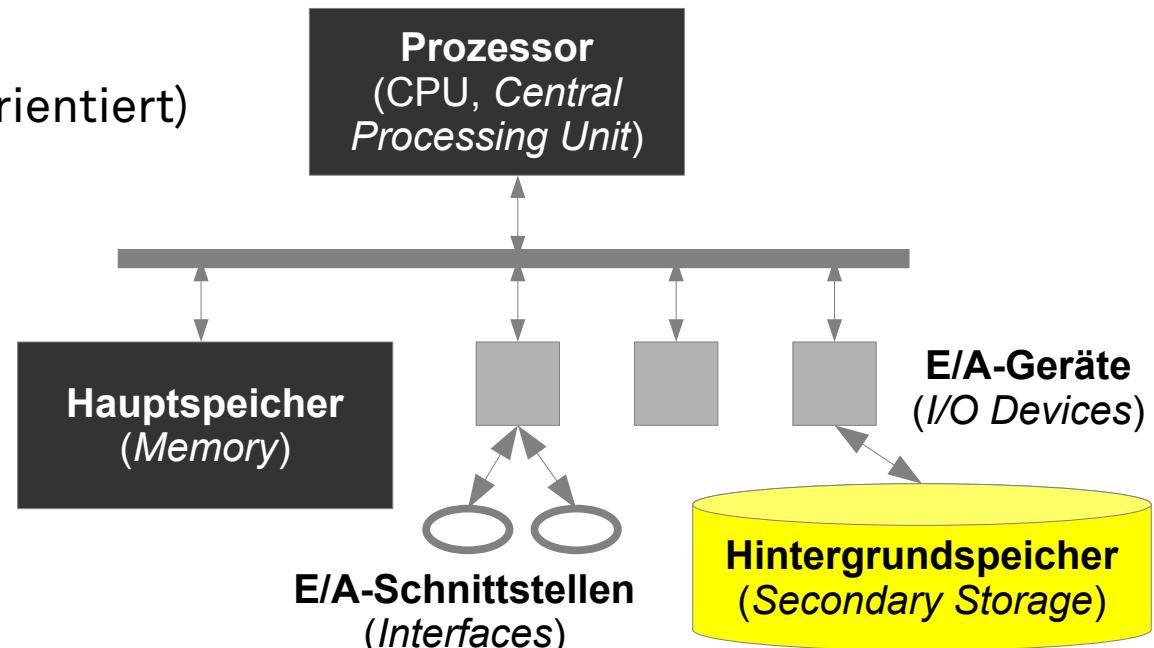
- Das Betriebssystem hat folgende Aufgaben:
 - Verwaltung der Betriebsmittel des Rechners
 - Schaffung von Abstraktionen, die Anwendungen einen einfachen und effizienten Umgang mit Betriebsmitteln erlauben

- **Bisher:**

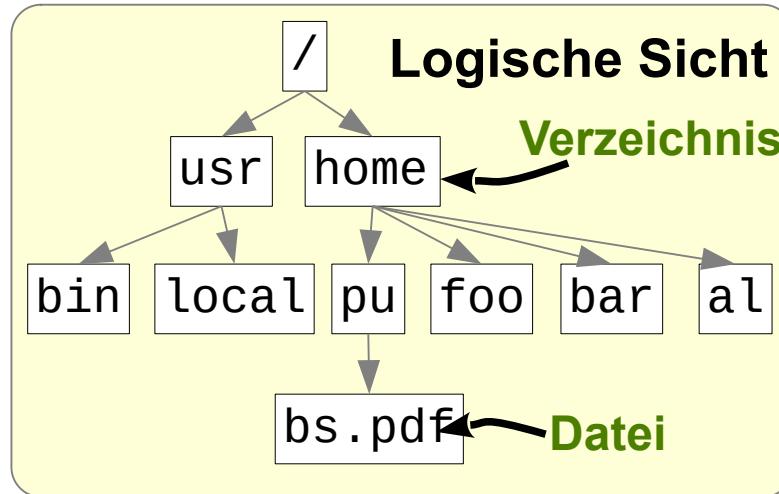
- **Prozesse**
- **Arbeitsspeicher**
- **E/A-Geräte** (insb. blockorientiert)

- **Heute: Dateisysteme**

- Organisation des Hintergrundspeichers



Hintergrundspeicher



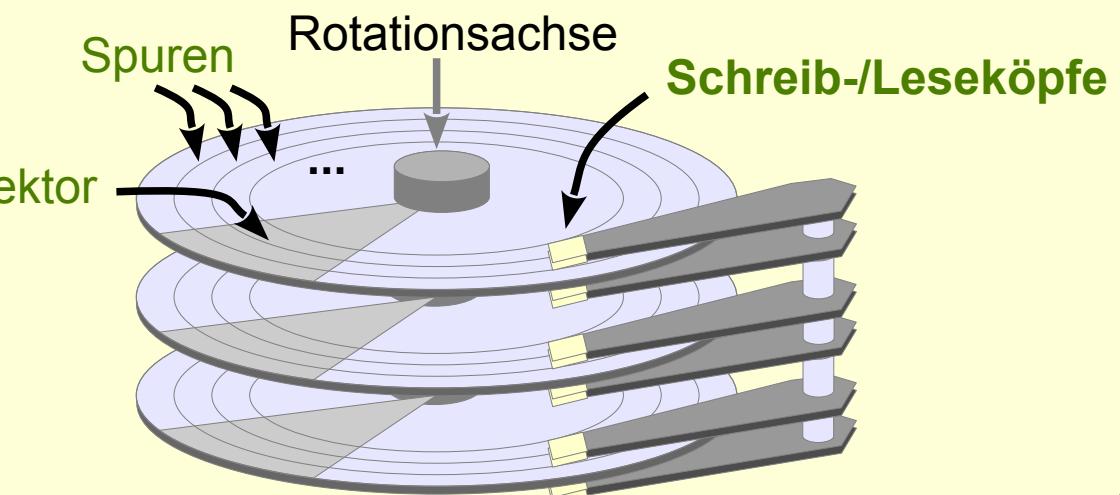
Dateisysteme erlauben die
dauerhafte Speicherung
großer Datenmengen.

Abbildung



Das Betriebssystem stellt
den Anwendungen die
logische Sicht zur
Verfügung und muss
diese effizient realisieren.

Physikalische Sicht



Festplatte mit
6 Oberflächen

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Tanenbaum

6: Dateisysteme

Silberschatz

10: File System

11: Implementing File Systems

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Tanenbaum

6: Dateisysteme

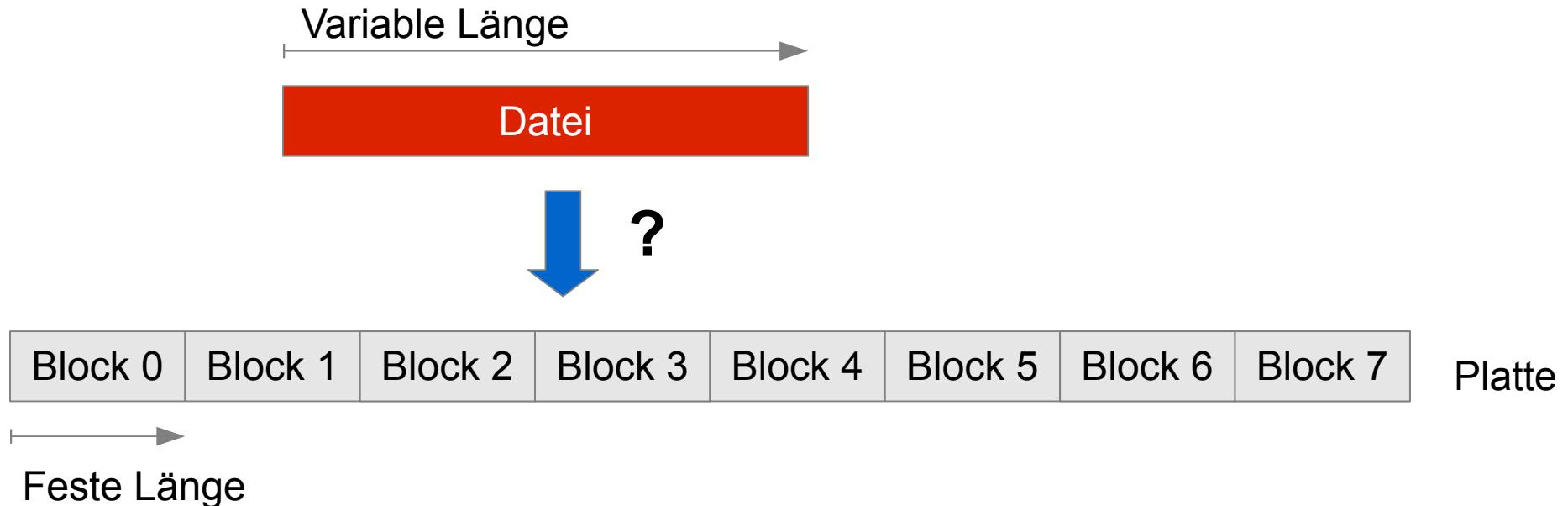
Silberschatz

10: File System

11: Implementing File Systems

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, z.B. **Start: Block 4; Länge: 3**.



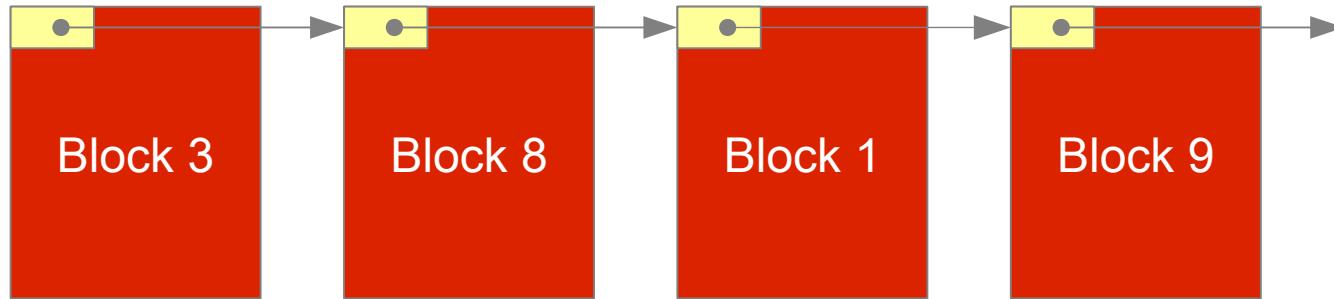
- **Vorteile:**
 - Zugriff auf alle Blöcke mit **minimaler Positionierzeit** des Schwenkarms
 - schneller direkter Zugriff auf **bestimmte Dateiposition**
 - Einsatz z.B. bei nicht modifizierbaren Dateisystemen wie auf CDs/DVDs

Kontinuierliche Speicherung: Probleme

- **Finden des freien Platzes auf der Festplatte**
 - Menge aufeinanderfolgender und freier Plattenblöcke
- **Fragmentierungsproblem**
 - Verschnitt: nicht nutzbare Plattenblöcke; analog zur Speicherverwaltung
- **Größe bei neuen Dateien oft nicht im Voraus bekannt**
- **Erweitern ist problematisch**
- **Umkopieren, falls kein freier angrenzender Block mehr verfügbar**

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**

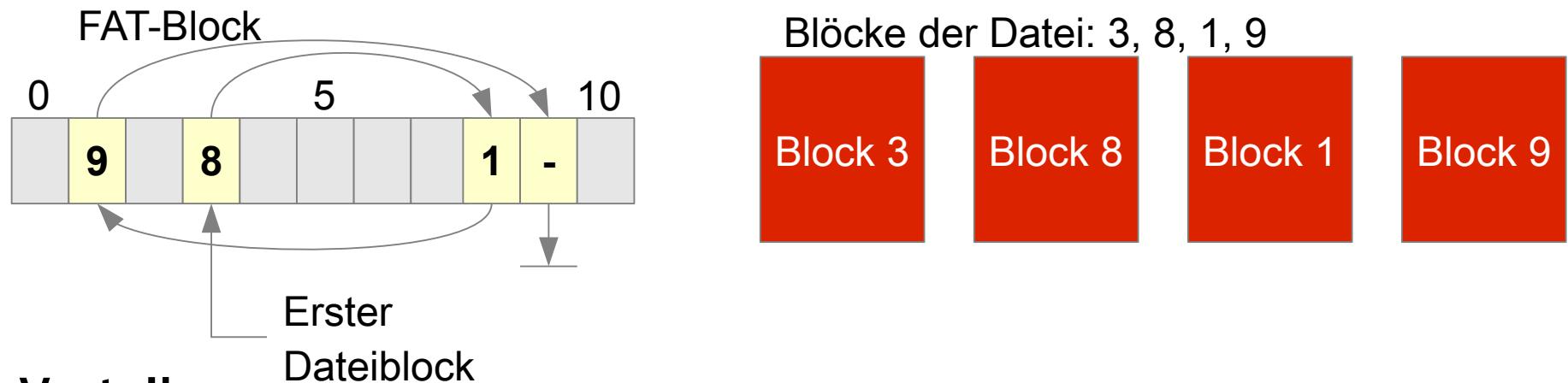
→ Datei kann **vergrößert und verkleinert** werden

Verkettete Speicherung: Probleme

- **Speicher für Verzeigerung geht von Nutzdaten im Block ab**
 - Ungünstig im Zusammenhang mit **Paging**: Seite würde immer aus Teilen von **zwei Plattenblöcken** bestehen
- **Fehleranfälligkeit**
 - Datei ist nicht restaurierbar, falls einmal Verzeigerung fehlerhaft
- **Schlechter direkter Zugriff auf bestimmte Dateiposition**
- **Häufiges Positionieren des Schreib-, Lesekopfs bei verstreuten Datenblöcken**

Verkettete Speicherung: FAT

- **Verkettung wird in separaten Plattenblöcken gespeichert**
 - FAT-Ansatz (FAT: *File Allocation Table*)
 - z.B. MS-DOS, Windows 95



- **Vorteile:**
 - kompletter Inhalt des Datenblocks ist nutzbar
 - mehrfache Speicherung der FAT möglich:
Einschränkung der Fehleranfälligkeit

Verkettete Speicherung: Probleme (2)

- **Zusätzliches Laden mindestens eines Blocks**
 - Caching der FAT zur Effizienzsteigerung nötig
- **Laden unbenötigter Informationen**
 - FAT enthält Verkettungen für alle Dateien
- **Aufwändige Suche nach dem zugehörigen Datenblock bei bekannter Position in der Datei**
- **Häufiges Positionieren des Schreib-, Lesekopfs bei verstreuten Datenblöcken**

Diskussion: *Chunks/Extents/Clusters*

■ Variation:

- Unterteilen einer Datei in kontinuierlich **gespeicherte Folgen von Blöcken** (*Chunk, Extent* oder *Cluster* genannt)
- Reduziert die Zahl der Positionierungsvorgänge
- Blocksuche wird linear in Abhängigkeit von der Chunk-Größe beschleunigt

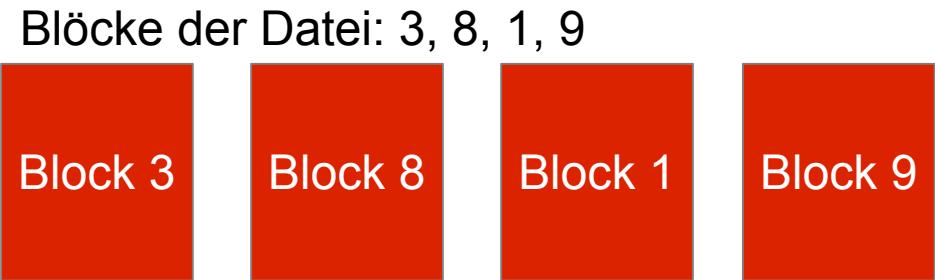
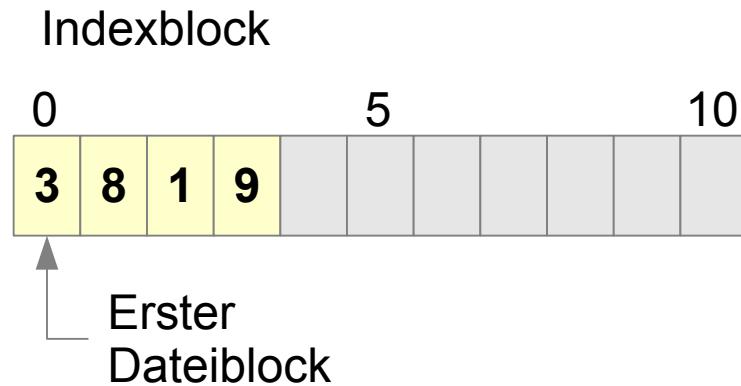
■ Probleme:

- zusätzliche Verwaltungsinformationen
- Verschnitt
 - feste Größe: **innerhalb** einer Folge (interner Verschnitt)
 - variable Größe: **außerhalb** der Folgen (externer Verschnitt)

■ Wird eingesetzt, bringt aber keinen fundamentalen Fortschritt.

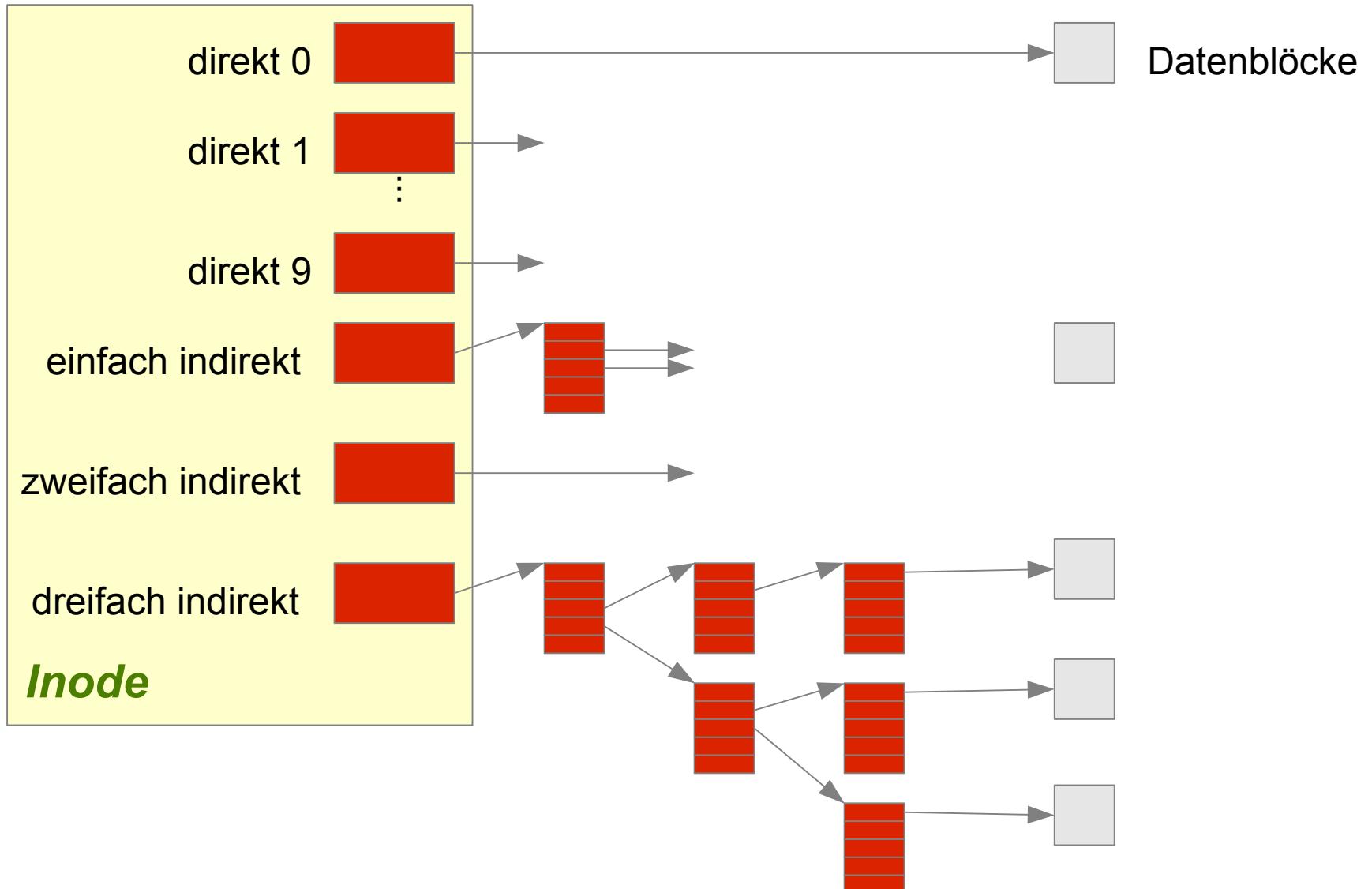
Indiziertes Speichern

- **Spezieller Plattenblock (Indexblock)** enthält Blocknummern der Datenblöcke einer Datei:



- **Problem:** Feste Anzahl von Blöcken im Indexblock
 - Verschnitt bei kleinen Dateien
 - Erweiterung nötig für große Dateien

Indiziertes Speichern: UNIX-Inode

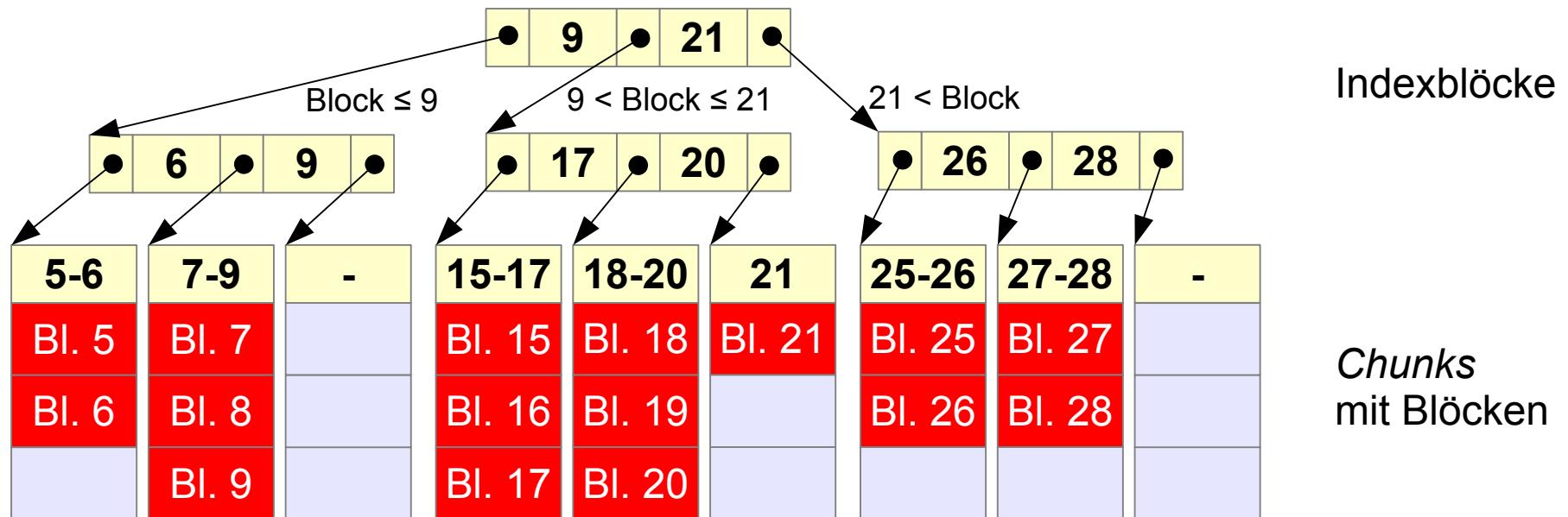


Indiziertes Speichern: Diskussion

- 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)

Baumsequentielle Speicherung

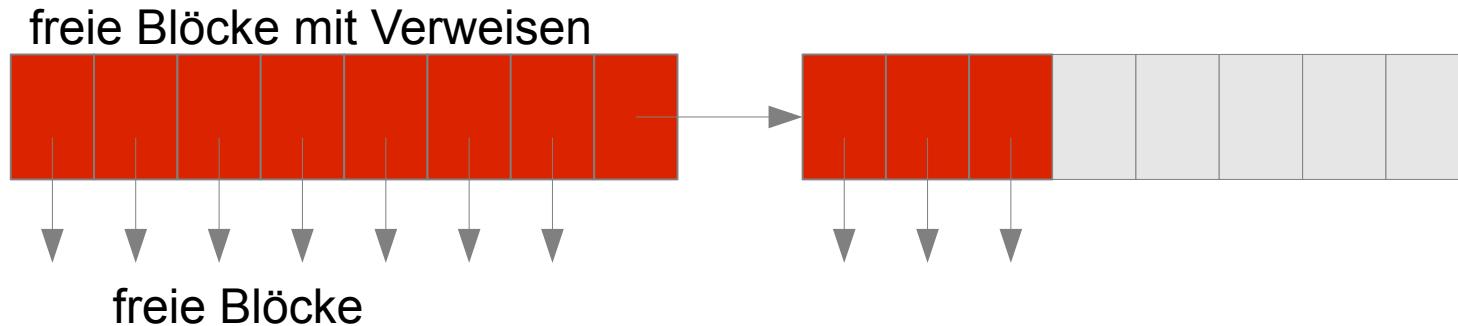
- Wird bei Datenbanken zum effizienten Auffinden eines Datensatzes mit Hilfe eines Schlüssels eingesetzt.
 - Schlüsselraum darf dünn besetzt sein.
- Kann auch verwendet werden, um Datei-*Chunks* mit bestimmtem Datei-*Offset* aufzufinden
 - z.B. NTFS, ReiserFS, Btrfs, IBMs JFS2-Dateisystem (B⁺-Baum)



Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Freispeicherverwaltung



Ähnlich wie Verwaltung von freiem Hauptspeicher

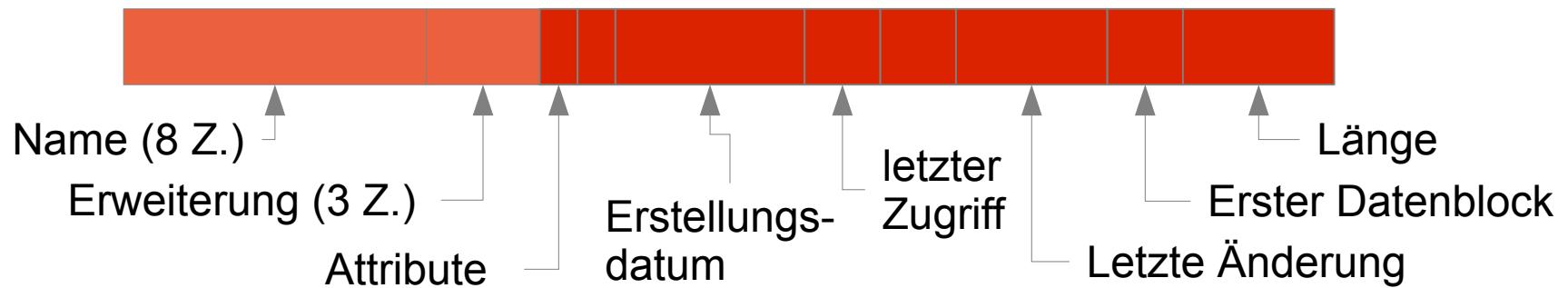
- **Bitvektoren** zeigen für jeden Block Belegung an
- oder **verkettete Listen** repräsentieren freie Blöcke
 - Verkettung kann in den freien Blöcken vorgenommen werden.
 - **Optimierung:** Aufeinanderfolgende Blöcke werden nicht einzeln aufgenommen, sondern am Stück verwaltet.
 - **Optimierung:** Ein freier Block enthält viele Blocknummern weiterer freier Blöcke, und evtl. die Blocknummer eines weiteren Blocks mit den Nummern freier Blöcke.
- **Baumsequentielle Speicherung** freier Blockfolgen
 - Erlaubt schnelle Suche nach freier Blockfolge bestimmter Größe
 - Anwendung z.B. im SGI XFS

Inhalt

- Dateien
 - Freispeicherverwaltung
 - Verzeichnisse
- Dateisysteme
 - Pufferspeicher
 - Dateisysteme mit Fehlererholung
 - Zusammenfassung

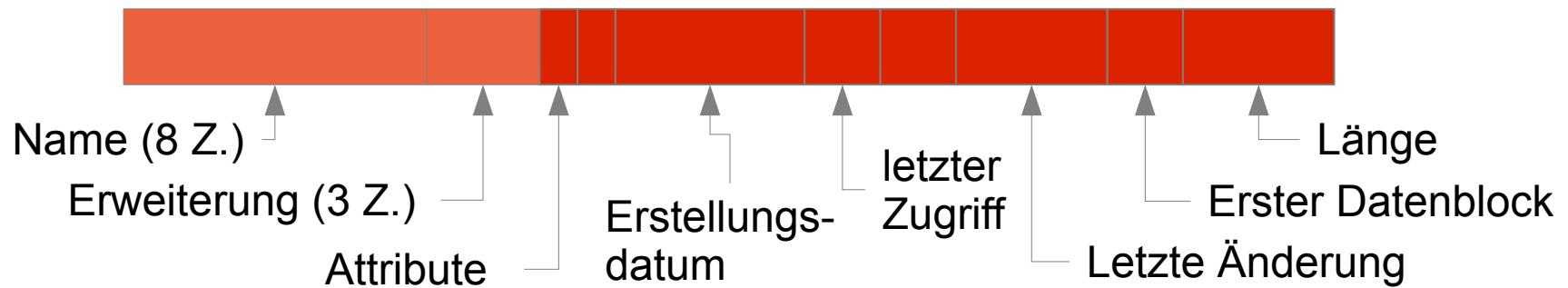
Verzeichnis als Liste

- Einträge gleicher Länge hintereinander in einer Liste, z.B.
 - *FAT File systems* (*VFAT* nutzt mehrere Einträge für lange Dateinamen)

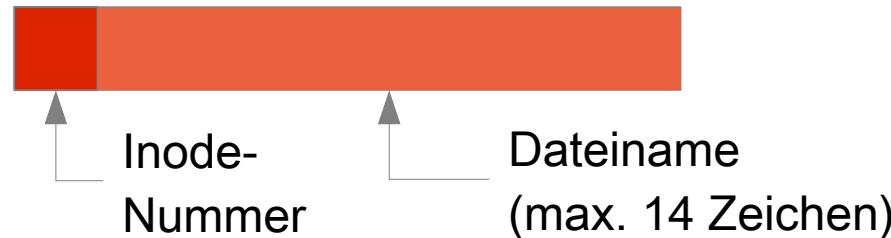


Verzeichnis als Liste

- Einträge gleicher Länge hintereinander in einer Liste, z.B.
 - *FAT File systems* (*VFAT* nutzt mehrere Einträge für lange Dateinamen)

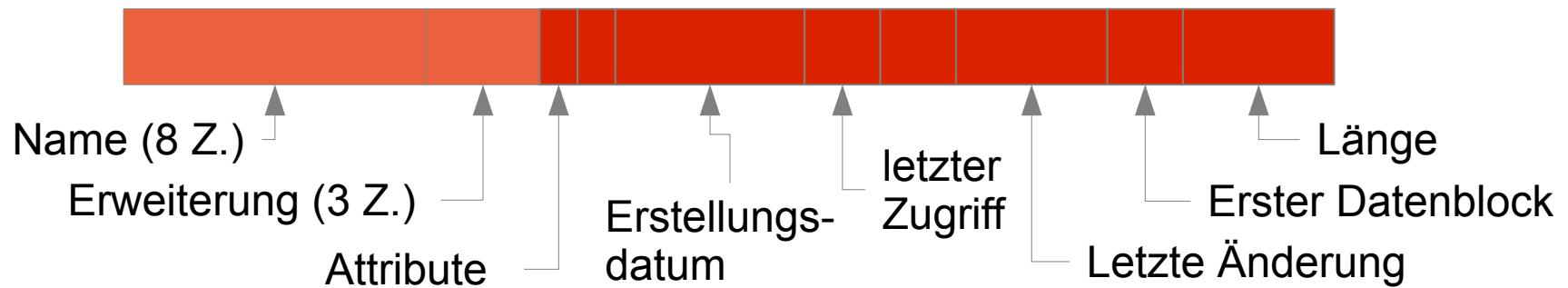


- *UNIX System V.3*

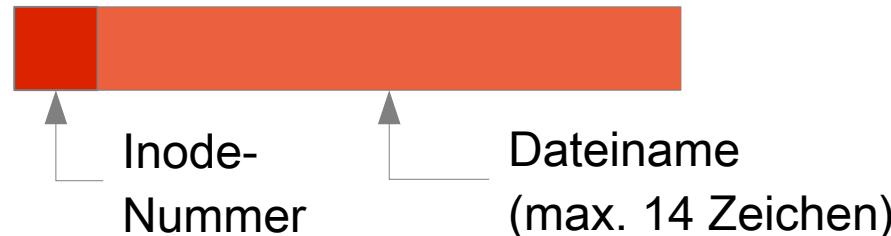


Verzeichnis als Liste

- Einträge gleicher Länge hintereinander in einer Liste, z.B.
 - *FAT File systems* (*VFAT* nutzt mehrere Einträge für lange Dateinamen)



- *UNIX System V.3*

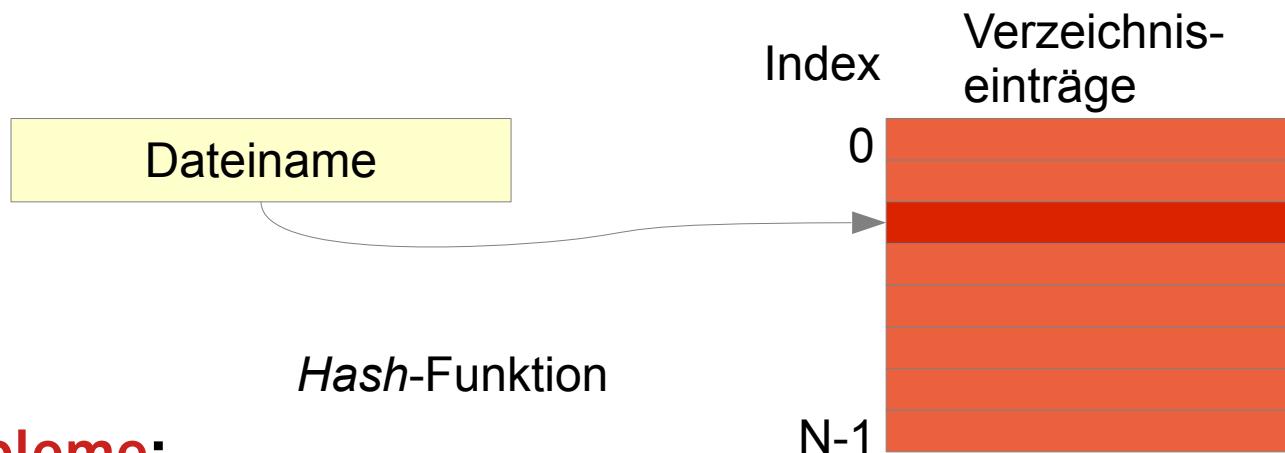


■ Probleme:

- Suche nach bestimmtem Eintrag muss linear erfolgen
- Bei Sortierung der Liste: Schnelles Suchen, Aufwand beim Einfügen

Einsatz von *Hash-Funktionen*

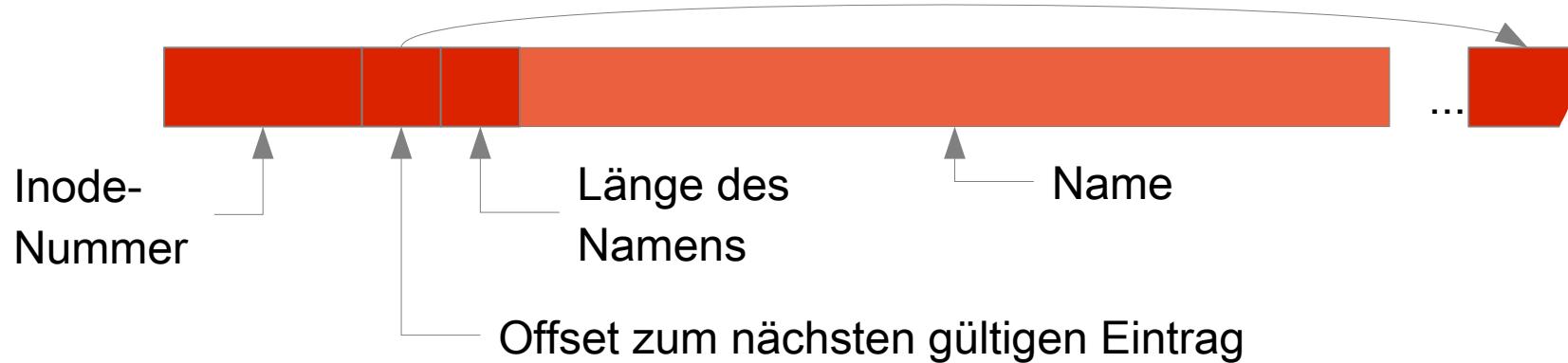
- Funktion bildet Dateinamen auf einen Index in die Katalogliste ab
 - schnellerer Zugriff auf den Eintrag möglich (kein lineares Suchen)
- Einfaches (aber schlechtes) Beispiel: $(\sum \text{Zeichen}) \bmod N$



- **Probleme:**
 - Kollisionen
(mehrere Dateinamen werden auf denselben Eintrag abgebildet)
 - Anpassung der Listengröße, wenn Liste voll

Variabel lange Listenelemente

- Beispiel: 4.2 BSD, System V Rel. 4, u.a.



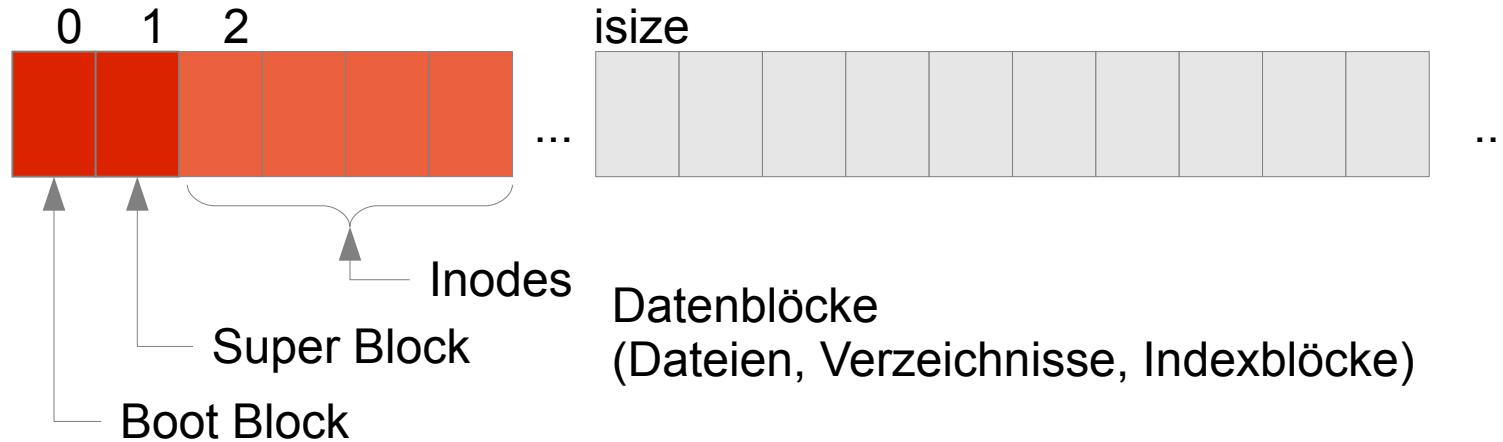
- **Probleme:**
 - Verwaltung von freien Einträgen in der Liste
 - Speicherverschnitt (Kompaktifizieren, etc.)

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

UNIX System V File System

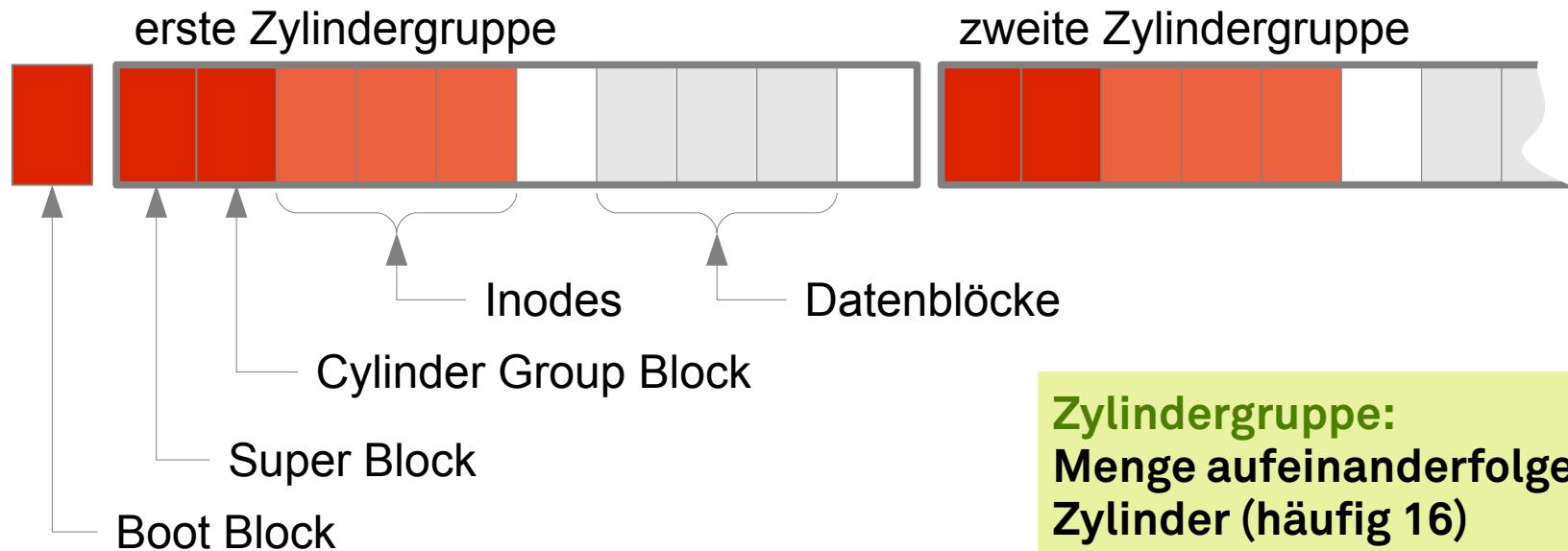
■ Blockorganisation



- **Boot Block** enthält Informationen zum Laden des Betriebssystems
- **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)

BSD 4.2 (*Berkeley Fast File System*)

- Blockorganisation

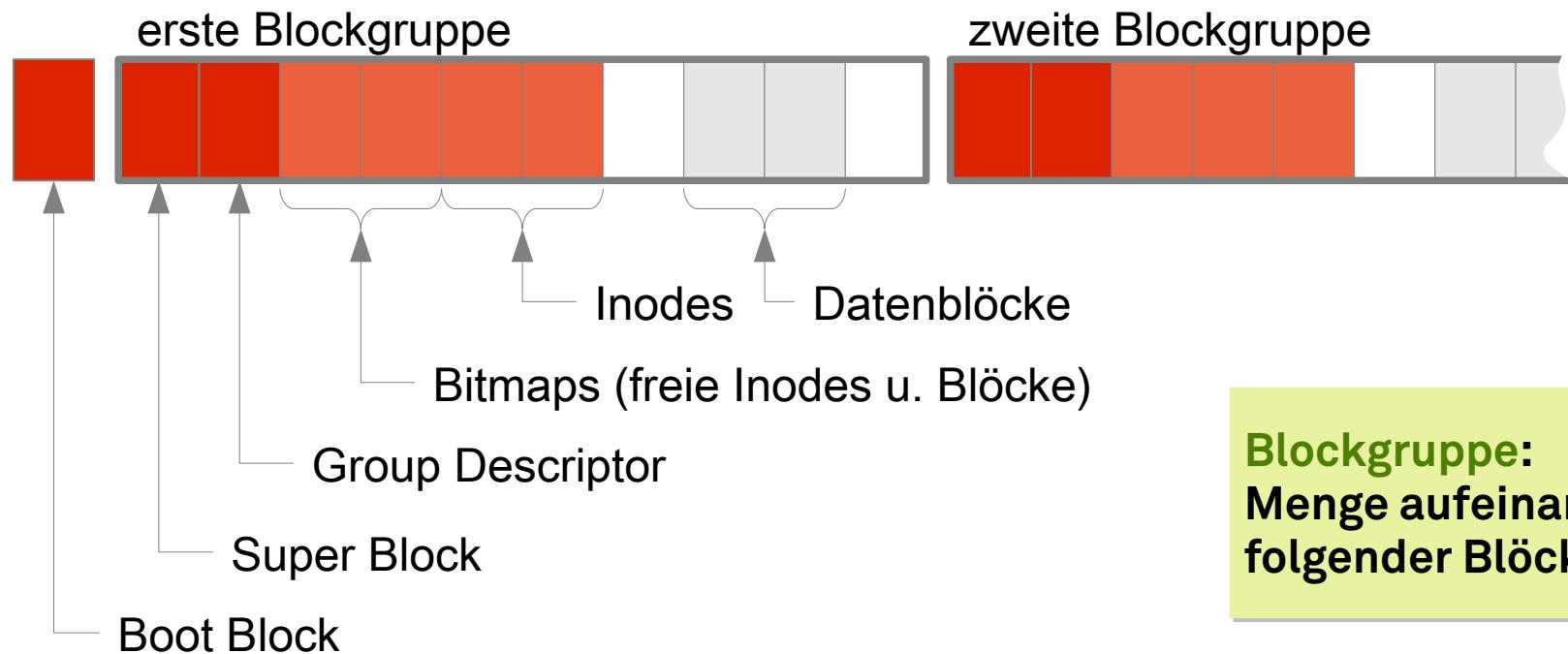


- **Kopie des Super Blocks** in jeder Zylindergruppe
- Eine Datei wird möglichst innerhalb einer Zylindergruppe gespeichert.
- Verzeichnisse werden verteilt, Dateien eines V. bleiben zusammen

- **Vorteil:** kürzere Positionierungszeiten

Linux ext2/3/4 File System

■ Blockorganisation



Blockgruppe:
Menge aufeinander
folgender Blöcke

- Ähnliches Layout wie BSD Fast File System
- Blockgruppen unabhängig von Zylindern

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

UNIX Block Buffer Cache

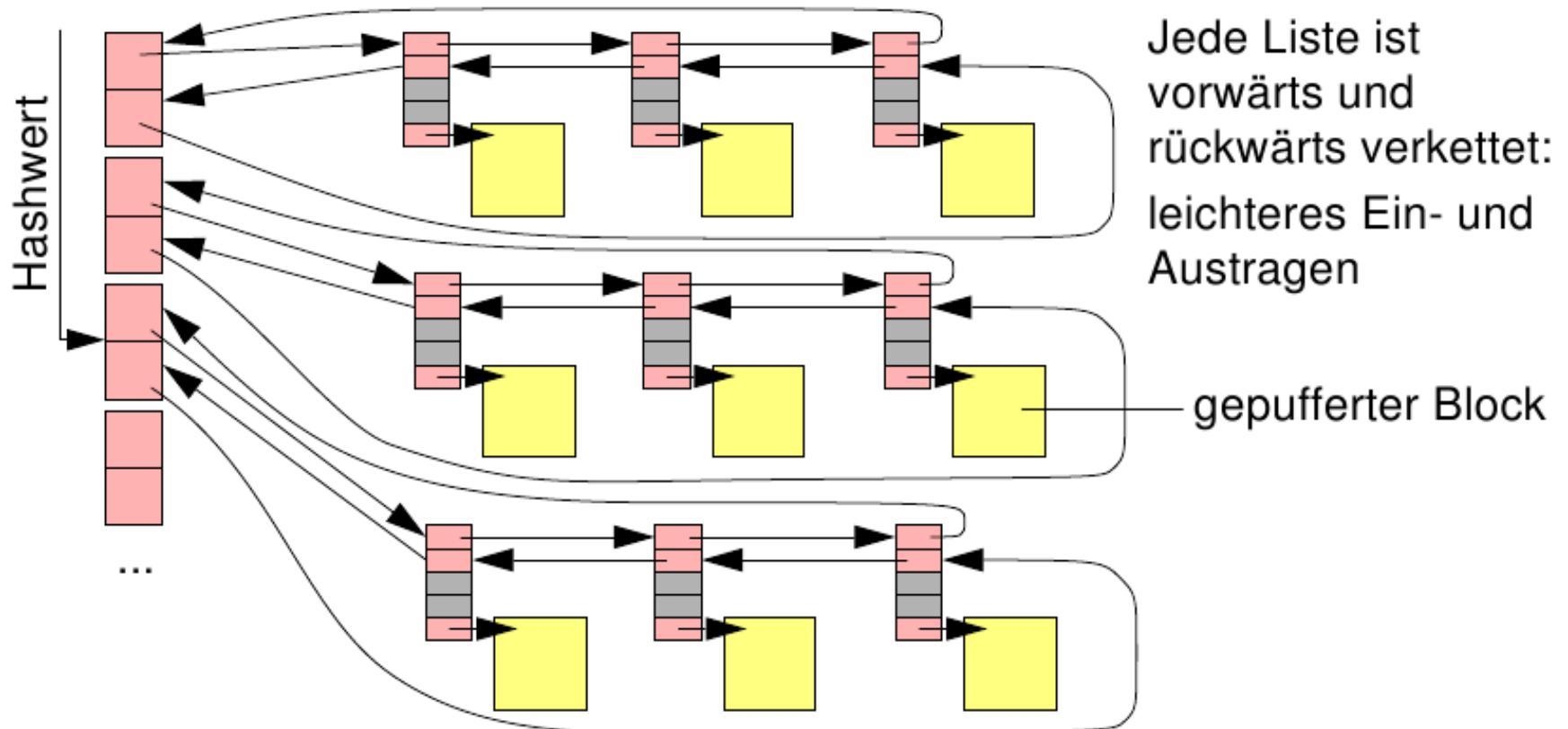
- Pufferspeicher für Plattenblöcke im Hauptspeicher
 - Verwaltung mit Algorithmen ähnlich wie bei Seitenverwaltung (Speicher)
 - **Read ahead**: beim sequentiellen Lesen wird auch der Transfer von Folgeblöcken angestoßen
 - **Lazy write**: Block wird nicht sofort auf Platte geschrieben (erlaubt Optimierung der Schreibzugriffe und blockiert den Schreiber nicht)
 - Verwaltung freier Blöcke in einer **Freiliste**:
 - Kandidaten für Freiliste werden nach LRU-Verfahren bestimmt
 - Bereits freie, aber noch nicht anderweitig benutzte Blöcke können reaktiviert werden (Reclaim)

UNIX Block Buffer Cache (2)

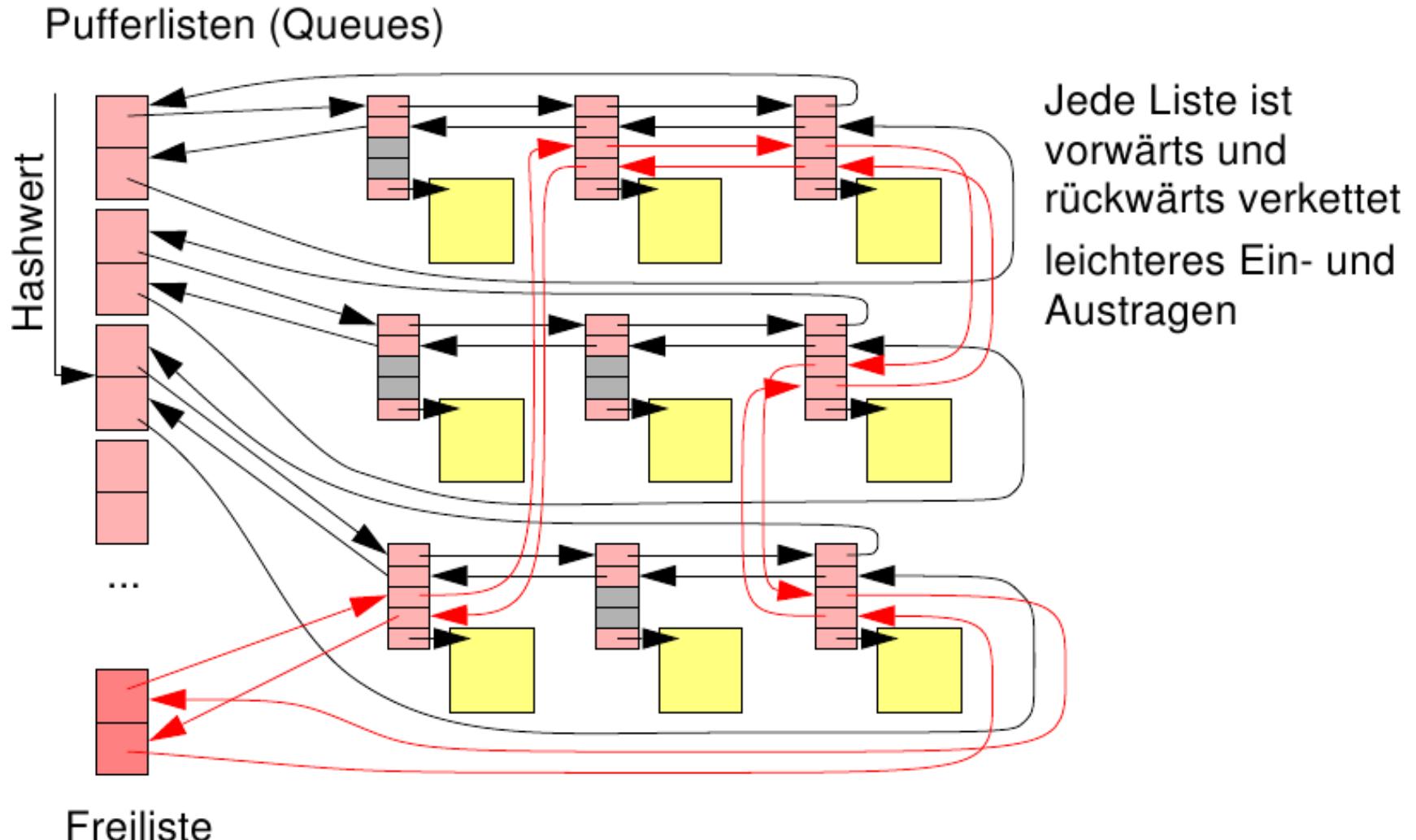
- Schreiben erfolgt, wenn ...
 - keine freien Puffer mehr vorhanden sind,
 - regelmäßig vom System (**fsflush**-Prozess, **update**-Prozess),
 - beim Systemaufruf **sync()**,
 - und nach jedem Schreibauftrag im Modus **O_SYNC** (siehe **open(2)**).
- Adressierung:
 - Adressierung eines Blocks erfolgt über ein Tupel:
(*Gerätenummer, Blocknummer*)
 - Über die Adresse wird ein Hash-Wert gebildet, der eine der möglichen Pufferlisten auswählt.

UNIX Block Buffer Cache: Aufbau

Pufferlisten (Queues)



UNIX Block Buffer Cache: Aufbau (2)



Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Dateisysteme mit Fehlererholung

- Mögliche Fehler:
 - Stromausfall (ahnungsloser Benutzer schaltet einfach Rechner aus)
 - Systemabsturz
- Auswirkungen auf das Dateisystem: 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
- Probleme:
 - Datenverluste bei Reparatur möglich
 - lange Laufzeiten der Reparaturprogramme bei großen Platten

Journaled File Systems

- Zusätzlich zum Schreiben der Daten und Meta-Daten (z.B. Inodes) wird ein Protokoll der Änderungen geführt
 - Alle Änderungen treten als Teil von Transaktionen auf.
 - Beispiele für **Transaktionen**:
 - Erzeugen, Löschen, Erweitern, Verkürzen von Dateien
 - Verändern von Dateiattributen
 - Umbenennen einer Datei
 - Protokollieren aller Änderungen am Dateisystem zusätzlich in einer Protokolldatei (**Log File**)
- Bootvorgang
 - Abgleich der Protokolldatei mit den aktuellen Änderungen
→ Vermeidung von Inkonsistenzen

Journaled File Systems: Protokoll

- Für jeden Einzelvorgang einer Transaktion wird zunächst ein Protokolleintrag erzeugt und ...
- danach die Änderung am Dateisystem vorgenommen.
- Dabei gilt:
 - Der Protokolleintrag wird immer **vor** der eigentlichen Änderung auf Platte geschrieben.
 - Wurde etwas auf Platte geändert, steht auch der Protokolleintrag dazu auf der Platte.

Journaled File Systems: Erholung

- **Beim Bootvorgang wird überprüft**, ob die protokollierten Änderungen vorhanden sind:
 - Transaktion kann wiederholt bzw. abgeschlossen werden, falls alle Protokolleinträge vorhanden → **Redo**
 - Angefangene, aber nicht beendete Transaktionen werden rückgängig gemacht → **Undo**

Journaled File Systems: Ergebnis

■ **Vorteile:**

- eine Transaktion ist entweder vollständig durchgeführt oder gar nicht
- Benutzer kann 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
 - Die Alternative **chkdsk** benötigt viel Zeit bei großen Platten.

■ **Nachteile:**

- ineffizienter, da zusätzliches Log-File geschrieben wird
 - daher meist nur *Metadata Journaling*, kein *Full Journaling*

■ **Beispiele:** NTFS, ext3/ext4, ReiserFS

Inhalt

- Dateien
- Freispeicherverwaltung
- Verzeichnisse
- Dateisysteme
- Pufferspeicher
- Dateisysteme mit Fehlererholung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung: Dateisysteme

- ... sind eine **Betriebssystemabstraktion**
 - Speicherung logisch zusammenhängender Informationen als Datei
 - Meist hierarchische Verzeichnisstruktur, um Dateien zu ordnen
- ... werden durch die **Hardware beeinflusst**
 - Minimierung der Positionierungszeiten bei Platten
 - Gleichmäßige „Abnutzung“ bei FLASH-Speicher
 - Kein *Buffer*-Cache bei RAM-Disks
- ... werden durch das **Anwendungsprofil beeinflusst**
 - Blockgröße
 - zu klein → Verwaltungsstrukturen können zu *Performance*-Verlust führen
 - zu groß → Verschnitt führt zu Plattenplatzverschwendungen
 - Aufbau von Verzeichnissen
 - keine *Hash*-Funktion → langwierige Suche
 - mit *Hash*-Funktion → mehr Aufwand bei der Verwaltung