

# 3. Foliensatz

## Betriebssysteme und Rechnernetze

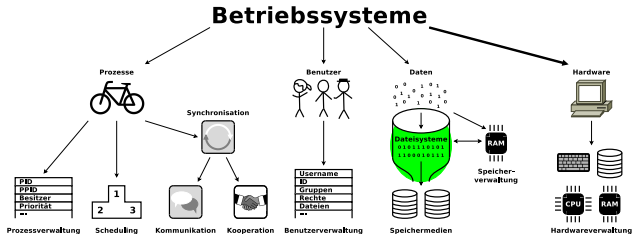
Prof. Dr. Christian Baun

Frankfurt University of Applied Sciences  
(1971–2014: Fachhochschule Frankfurt am Main)  
Fachbereich Informatik und Ingenieurwissenschaften  
[christianbaun@fb2.fra-uas.de](mailto:christianbaun@fb2.fra-uas.de)

# Lernziele dieses Foliensatzes

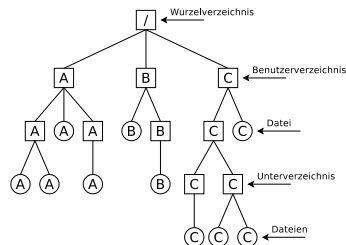
- Am Ende dieses Foliensatzes kennen/verstehen Sie...
  - die **Aufgaben und Grundbegriffe von Dateisystemen**
  - was **Inodes** und **Cluster** sind
  - wie **Blockadressierung** funktioniert
  - den **Aufbau** ausgewählter Dateisysteme
  - eine Übersicht über die **Windows-Dateisysteme** und deren Eckdaten
  - was **Journaling** ist und warum es viele Dateisysteme implementieren
  - wie **Extent-basierte Adressierung** funktioniert
  - was **Copy-On-Write** ist
  - ~~wie Defragmentierung funktioniert~~

Übungsblatt 3 wiederholt die für die Lernziele relevanten Inhalte dieses Foliensatzes



# Dateisysteme...

- organisieren die Ablage von Dateien auf Datenspeichern
  - Dateien sind beliebig lange Folgen von Bytes und enthalten inhaltlich zusammengehörende Daten
- verwalten Dateinamen und Attribute (Metadaten) der Dateien
- bilden einen Namensraum
  - Hierarchie von Verzeichnissen und Dateien



- Absolute Pfadnamen:** Beschreiben den kompletten Pfad **von der Wurzel bis zur Datei**
- Relative Pfadnamen:** Alle Pfade, die **nicht mit der Wurzel** beginnen

- sind eine Schicht/Funktionalität des Betriebssystems
  - Prozesse und Benutzer greifen auf Dateien abstrakt über deren Dateinamen und nicht direkt auf Speicheradressen zu
- sollen wenig Overhead für Verwaltungsinformationen verursachen

# Technische Grundlagen der Dateisysteme

- Dateisysteme adressieren **Cluster** und nicht Blöcke bzw. Sektoren des Datenträgers
  - Jede Datei belegt eine ganzzahlige Menge an Clustern
  - In der Literatur heißen die Cluster häufig **Zonen** oder **Blöcke**
    - Das führt zu Verwechslungen mit den Sektoren der Laufwerke, die in der Literatur auch manchmal Blöcke heißen
- Die Größe der Cluster ist wichtig für die Effizienz des Dateisystems
  - Je kleiner die Cluster...
    - Steigender Verwaltungsaufwand für große Dateien
    - Abnehmender Kapazitätsverlust durch interne Fragmentierung
  - Je größer die Cluster...
    - Abnehmender Verwaltungsaufwand für große Dateien
    - Steigender Kapazitätsverlust durch interne Fragmentierung

Je größer die Cluster, desto mehr Speicher geht durch interne Fragmentierung verloren

- Dateigröße: 1 kB. Clustergröße: 2 kB  $\Rightarrow$  1 kB geht verloren
- Dateigröße: 1 kB. Clustergröße: 64 kB  $\Rightarrow$  63 kB gehen verloren!

- Die Clustergröße kann man beim Anlegen des Dateisystems festlegen

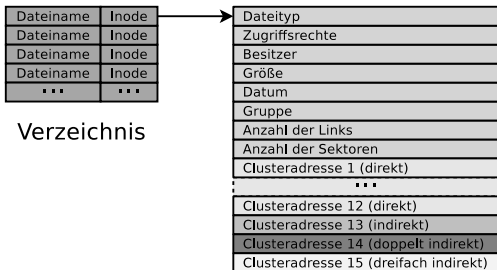
# Grundbegriffe von Linux-Dateisystemen

Unter Linux gilt: Clustergröße  $\leq$  Größe der Speicherseiten (Pagesize)

- Die Pagesize hängt von der Architektur ab
- x86 = 4 kB, Alpha und UltraSPARC = 8 kB, Apple Silicon = 16 kB, IA-64 = 4/8/16/64 kB
- Wird eine **Datei** angelegt, wird auch ein **Inode** (*Index Node*) angelegt
  - Er speichert die Verwaltungsdaten (*Metadaten*) einer Datei, außer dem Dateinamen
    - Metadaten sind u.a. Dateigröße, UID/GID, Zugriffsrechte und Datum
  - Jeder Inode hat eine im Dateisystem eindeutige Inode-Nummer
  - Im Inode wird auf die Cluster der Datei verwiesen
  - Alle Linux-Dateisysteme basieren auf dem Funktionsprinzip der Inodes
- Auch ein **Verzeichnis** ist eine Datei (siehe Folie 12)
  - Inhalt: Dateiname und Inode-Nummer für jede Datei des Verzeichnisses
- Arbeitsweise der Linux-Dateisysteme traditionell: **Blockadressierung**
  - Eigentlich ist der Begriff irreführend, weil Dateisysteme immer Cluster adressieren und nicht Blöcke bzw. Sektoren (des Datenträgers)
    - Der Begriff ist aber seit Jahrzehnten in der Literatur etabliert

# Blockadressierung am Beispiel ext2/3

- Jeder Inode speichert die Nummern von bis zu 12 Clustern direkt



Inode

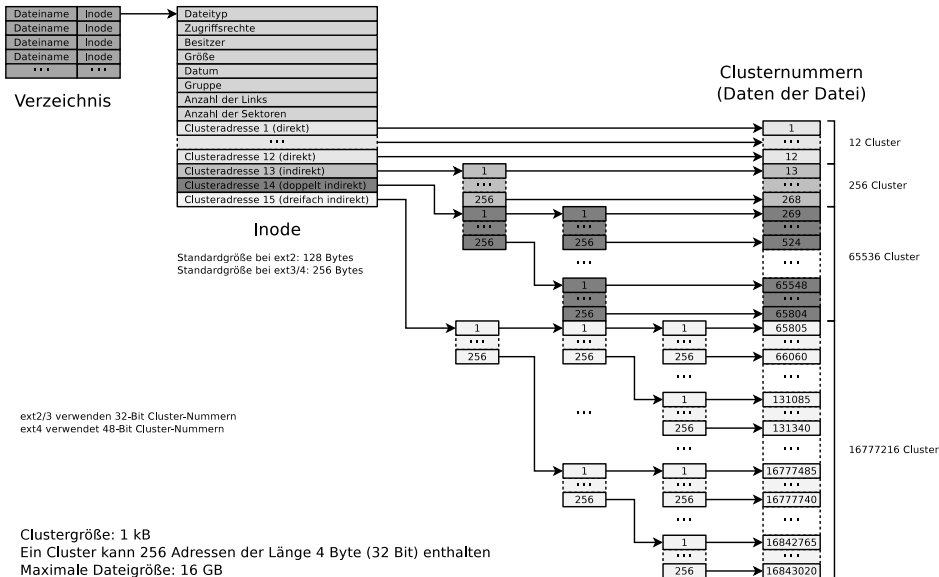
- Benötigt eine Datei mehr Cluster, wird indirekt adressiert mit Clustern, deren Inhalt Clusternummern sind
- Blockadressierung verwenden Minix, ext2/3, ReiserFS und Reiser4

## Gute Erklärung

<http://lwn.net/Articles/187321/>

- Szenario: Im Dateisystem können keine Dateien mehr erstellt werden, obwohl noch ausreichend freie Kapazität vorhanden ist
- Mögliche Erklärung: Es sind keine Inodes mehr verfügbar
- Das Kommando `df -i` zeigt, wie viele Inodes existieren wie viele noch verfügbar sind

# Direkte und indirekte Adressierung am Beispiel ext2/3

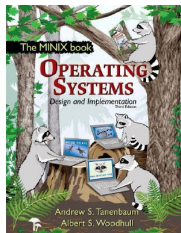


# Minix

## Das Betriebssystem Minix

<http://www.minix3.org>

- Unix-ähnliches Betriebssystem
- Wird seit 1987 von Andrew S. Tanenbaum als Lehrsystem entwickelt  
<https://www.youtube.com/watch?v=bx3KuE7UjGA>
- Aktuelle Version: 3.3.0 aus dem Jahr 2014
- Auf Intel-Chipsätzen nach 2015 läuft MINIX 3 intern als Software-Komponente der Intel Management Engine  
<https://www.zdnet.com/article/minix-intels-hidden-in-chip-operating-system/>  
<https://linuxnews.de/2017/11/minix-in-der-intel-management-engine/>  
<https://itsfoss.com/fact-intel-minix-case/>



- Standard-Dateisystem unter Linux bis 1992
  - Naheliegend, denn Minix war die Grundlage der Entwicklung von Linux
- Verwaltungsaufwand des Minix-Dateisystems ist gering
  - Sinnvolle Einsatzbereiche „heute“: Boot-Disketten und RAM-Disks
- Speicher wird als lineare Kette gleichgroßer Cluster (1-8 kB) dargestellt
- Ein Minix-Dateisystem enthält nur 6 Bereiche
  - Die einfache Struktur macht es für die Lehre optimal

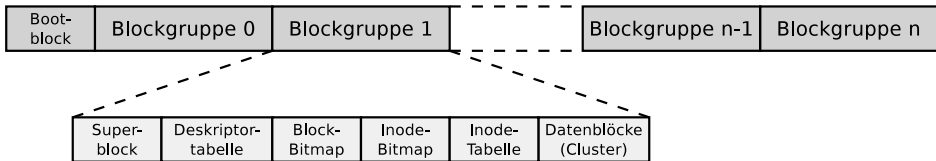


# Bereiche in einem Minix-Dateisystem

Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4	Bereich 5	Bereich 6
Bootblock (1 Cluster)	Superblock (1 Cluster)	Inodes-Bitmap (1 Cluster)	Cluster-Bitmap (1 Cluster)	Inodes (15 Cluster)	Daten (Restliche Cluster)

- **Bootblock.** Enthält den Boot-Loader, der das Betriebssystem startet
- **Superblock.** Enthält Informationen über das Dateisystem,
  - z.B. Anzahl der Inodes und Cluster
- **Inodes-Bitmap.** Enthält eine Liste aller Inodes mit der Information, ob der Inode belegt (Wert: 1) oder frei (Wert: 0) ist
- **Cluster-Bitmap.** Enthält eine Liste aller Cluster mit der Information, ob der Cluster belegt (Wert: 1) oder frei (Wert: 0) ist
- **Inodes.** Enthält Inodes mit den Metadaten
  - Jede Datei und jedes Verzeichnis ist von einem Inode repräsentiert, der Metadaten enthält
    - Metadaten sind u.a. Dateityp, UID/GID, Zugriffsrechte, Größe
- **Daten.** Hier ist der Inhalt der Dateien und Verzeichnisse
  - Das ist der größte Bereich im Dateisystem

# Bereiche in einem ext2/3/4-Dateisystem



- Die Cluster des Dateisystems werden in **Blockgruppen** gleicher Größe zusammengefasst
  - Die Informationen über die Metadaten und freien Cluster jeder Blockgruppe werden in der jeweiligen Blockgruppe verwaltet

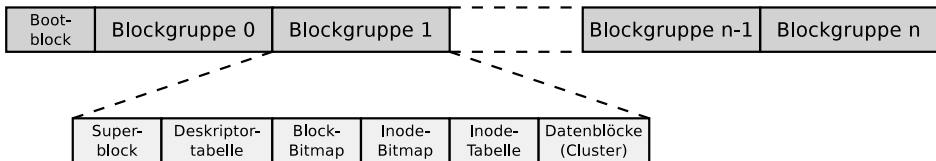
Maximale Größe einer Blockgruppe: 8x Clustergröße in Bytes

Beispiel: Ist die Clustergröße 4096 Bytes, kann jede Blockgruppe maximal 32768 Cluster umfassen.

⇒ Die maximale Blockgröße ist somit  $32768 \text{ Cluster} * 4096 \text{ Bytes Clustergröße} = 134.217.728 \text{ Bytes} = 131.072 \text{ kB} = 128 \text{ MB}$

- Vorteil der Blockgruppen (bei Festplatten!): Die Inodes (Metadaten) liegen physisch nahe bei den Clustern, die sie adressieren
  - Das reduziert die Suchzeiten und den Grad der Fragmentierung
  - Bei Flash-Speicher ist die Position der Daten in den einzelnen Speicherzellen für die Zugriffsgeschwindigkeit irrelevant

# Schema der Blockgruppen bei ext2/3/4



- Der erste Cluster enthält den **Bootblock** (Größe: 1 kB)
  - Er enthält den Bootmanager, der das Betriebssystem startet
- Jede Blockgruppe enthält eine **Kopie des Superblocks**
  - Das verbessert die Datensicherheit
- Die **Deskriptor-Tabelle** enthält u.a.
  - Die Clusternummern des Block-Bitmaps und des Inode-Bitmaps
  - Die Anzahl der freien Cluster und Inodes in der Blockgruppe
- **Block-** und **Inode-Bitmap** sind jeweils einen Cluster groß
  - Sie enthalten die Information, welche Cluster und welche Inodes in der Blockgruppe belegt sind
- Die **Inode-Tabelle** enthält die Inodes der Blockgruppe
- Die restlichen Cluster der Blockgruppe sind für die **Daten** nutzbar

# Dateisysteme analysieren (1/3)

## Wiederholung

Verzeichnisse sind  
Dateien mit  
Dateinamen und  
Inode-Nummern

Da kann man doch mal  
reinschauen...

Mit der Spezifikation  
des Dateisystems und  
geeigneten Werkzeugen  
können u.a. die  
einzelnen Felder der  
Verzeichniseinträge  
untersucht werden.  
Zum Beispiel der  
Eintrag von  
liesmich.txt

```
# lsblk | grep sda1
sda            8:0      1  29,3G  0 disk
sda1           8:1      1  29,3G  0 part

# mkfs.ext4 /dev/sda1

# mkdir /mnt/test
# mount -t ext4 /dev/sda1 /mnt/test/

# df -h | grep test
/dev/sda1      29G      45M   28G    1% /mnt/test

# ls -l /mnt/test
insgesamt 16
drwx----- 2 root root 16384 Sep 14 09:38 lost+found

# mkdir /mnt/test/testfolder
# echo "Betriebssysteme" > /mnt/test/testfolder/liesmich.txt
# echo "OpSys" > /mnt/test/testfolder/file2.txt
# echo "12345" > /mnt/test/testfolder/anotherfile.dat
# touch /mnt/test/testfolder/empty_file

# ls -lai /mnt/test/testfolder/
insgesamt 20
392449 drwxr-xr-x 2 root root 4096 Sep 14 09:59 .
          2 drwxr-xr-x 4 root root 4096 Sep 14 09:46 ..
392452 -rw-r--r-- 1 root root    6 Sep 14 09:58 anotherfile.dat
392453 -rw-r--r-- 1 root root    0 Sep 14 09:59 empty_file
392451 -rw-r--r-- 1 root root    6 Sep 14 09:47 file2.txt
392450 -rw-r--r-- 1 root root   16 Sep 14 09:47 liesmich.txt
```

# Dateisysteme analysieren (2/3)

Wir analysieren den Inhalt von `testfolder.out` mit Kommandozeilenwerkzeugen wie `hexdump` oder `od` (octal dump). Alternativ ginge auch ein grafischer grafisches Werkzeug wie z.B. `wxHexEditor` (siehe Folie 27).

```
# debugfs /dev/sda1
debugfs 1.44.5 (15-Dec-2018)
debugfs: imap <392449>
Inode 392449 is part of block group 48
    located at block 1572896, offset 0x0000
debugfs: dump testfolder testfolder.out
debugfs: quit

# ls -l testfolder.out
-rw-r--r-- 1 root root 4096 Sep 14 10:00 testfolder.out

# hexdump -C testfolder.out
00000000 01 fd 05 00 0c 00 01 02 2e 00 00 00 02 00 00 00 |.....|
00000010 0c 00 02 02 2e 2e 00 00 02 fd 05 00 14 00 0c 01 |.....|
00000020 6c 69 65 73 6d 69 63 68 2e 74 78 74 03 fd 05 00 |liesmich.txt...|
00000030 14 00 09 01 66 69 6c 65 32 2e 74 78 74 00 00 00 |...file2.txt...|
00000040 04 fd 05 00 18 00 0f 01 61 6e 6f 74 68 65 72 66 |.....anotherf|
00000050 69 6c 65 2e 64 61 74 00 05 fd 05 00 9c 0f 0a 01 |ile.dat.....|
00000060 65 6d 70 74 79 5f 66 69 6c 65 00 00 00 00 00 00 |empty_file.....|
00000070 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 |.....|
...
```

## Ein Hex-Editor stellt die Daten auf verschiedene Arten dar

- 1. Spalte: Anzahl der vorausgegangenen Bytes  $\Rightarrow$  Offset bzw. Positionsangabe (Adresse) in der Datei in Hex-Schreibweise (Wertebereich 0-F)
- 2. Spalte: Bytes der Zeile in hexadezimaler Darstellung
- 3. Spalte: Bytes der Zeile in ASCII-Darstellung

## Einige Grundlagen...

- Hexadezimalsystem  $\Rightarrow$  Basis 16
- 1 Hex-Zeichen stellt 4 Bits dar
- 2 Hex-Zeichen stellen 1 Byte dar

# Dateisysteme analysieren (3/3)

[https://ext4.wiki.kernel.org/index.php/Ext4\\_Disk\\_Layout](https://ext4.wiki.kernel.org/index.php/Ext4_Disk_Layout)

Offset	Größe	Name	Bedeutung
0x0	4 Bytes	inode	Nummer des Inodes auf den der Verzeichniseintrag verweist
0x4	2 Bytes	record length	Länge dieses Verzeichniseintrags
0x6	1 Byte	name length	Länge des Dateinamens
0x7	1 Byte	file type	0x0 = Unbekannt, 0x1 = Reguläre Datei, 0x2 = Verzeichnis, 0x3 = Zeichenorientierte Gerätedatei, 0x4 = Blockorientierte Gerätedatei, 0x5 = FIFO (Benannte Pipe), 0x6 = Socket, 0x7 = symbolischer Link
0x8	Zeichenkette	name	Dateiname

## Hinweis zur Byte-Reihenfolge Big-Endian vs. Little-Endian

x86-Prozessoren verwenden die **Little-Endian** **Byte-Reihenfolge**. Besteht ein Datenfeld aus mehreren Bytes, liegt das Least Significant Byte (LSB) an erster Stelle, also auf der niedrigsten Speicheradresse. Die höherwertigen Bytes liegen auf den nachfolgenden Speicheradressen

```
00000010 -- -- -- -- -- -- -- -- 02 fd 05 00 14 00 0c 01 |.....|
00000020 6c 69 65 73 6d 69 63 68 2e 74 78 74 -- -- -- -- |liesmich.txt....|
```

Inode-Nummer: 02 fd 05 00  $\Rightarrow$  00 05 fd 02

```
$ printf "%d\n" 0x0005fd02
392450
```

Länge des Verzeichniseintrags: 14 00  $\Rightarrow$  00 14  $\Rightarrow$  20 Bytes

```
$ printf "%d\n" 0x0014
20
```

Länge des Dateinamens: 0c  $\Rightarrow$  12 Bytes  
Dateityp: 01  $\Rightarrow$  Reguläre Datei

# Dateisysteme mit Dateizuordnungstabellen

Das Dateisystem FAT wurde 1980 mit QDOS, später umbenannt in MS-DOS, veröffentlicht

QDOS = Quick and Dirty Operating System

- Das Dateisystem File Allocation Table (FAT) basiert auf der gleichnamigen Datenstruktur, deren deutsche Bezeichnung Dateizuordnungstabelle ist
- Die FAT (**Dateizuordnungstabelle**) ist eine Tabelle fester Größe
- Für jeden Cluster des Dateisystems existiert ein Eintrag in der FAT mit folgenden Informationen über den Cluster:
  - Cluster ist frei oder das Medium an dieser Stelle beschädigt
  - Cluster ist von einer Datei belegt
    - In diesem Fall speichert er die Adresse des nächsten Clusters, der zu dieser Datei gehört oder er ist der letzte Cluster der Datei
- Die Cluster einer Datei bilden eine verkettete Liste (**Clusterkette**)  
⇒ siehe Folien 18 und 20

# Bereiche in einem FAT-Dateisystem (1/2)

Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4	Bereich 5	Bereich 6
Bootsektor	Reservierte Sektoren	FAT1	FAT2	Stammverzeichnis	Daten

- Im **Bootsektor** liegen ausführbarer x86-Maschinencode, der das Betriebssystem starten soll, und Informationen über das Dateisystem:
  - Blockgröße des Speichermediums (512, 1024, 2048 oder 4096 Bytes)
  - Anzahl der Blöcke pro Cluster
  - Anzahl der Blöcke (Sektoren) auf dem Speichermedium
  - Beschreibung des Speichermediums
  - Beschreibung der FAT-Version
- Zwischen Bootsektor und (erster) FAT können sich optionale **reservierte Sektoren**, z.B. für den Bootmanager, befinden
  - Diese Cluster können nicht vom Dateisystem benutzt werden

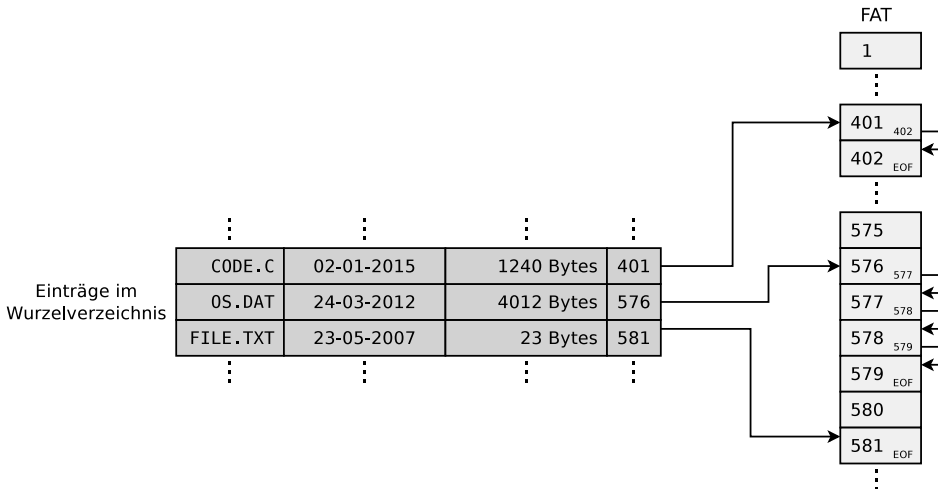


## Bereiche in einem FAT-Dateisystem (2/2)

Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4	Bereich 5	Bereich 6
Bootsektor	Reservierte Sektoren	FAT1	FAT2	Stammverzeichnis	Daten

- In der **Dateizuordnungstabelle** (FAT) sind die belegten und freien Cluster im Dateisystem erfasst
  - Konsistenz der FAT ist für die Funktionalität des Dateisystems elementar
    - Darum existiert üblicherweise eine Kopie der FAT, um bei Datenverlust noch eine vollständige FAT als Backup zu haben
- Im **Stammverzeichnis** (Wurzelverzeichnis) ist jede Datei und jedes Verzeichnis durch einen Eintrag repräsentiert:
  - Bei FAT12 und FAT16 befindet sich das Stammverzeichnis direkt hinter der FAT und hat eine feste Größe
    - Die maximale Anzahl an Verzeichniseinträgen ist somit begrenzt
  - Bei FAT32 kann sich das Stammverzeichnis an beliebiger Position im Datenbereich befinden und hat eine variable Größe
- Der letzte Bereich enthält die eigentlichen **Daten**

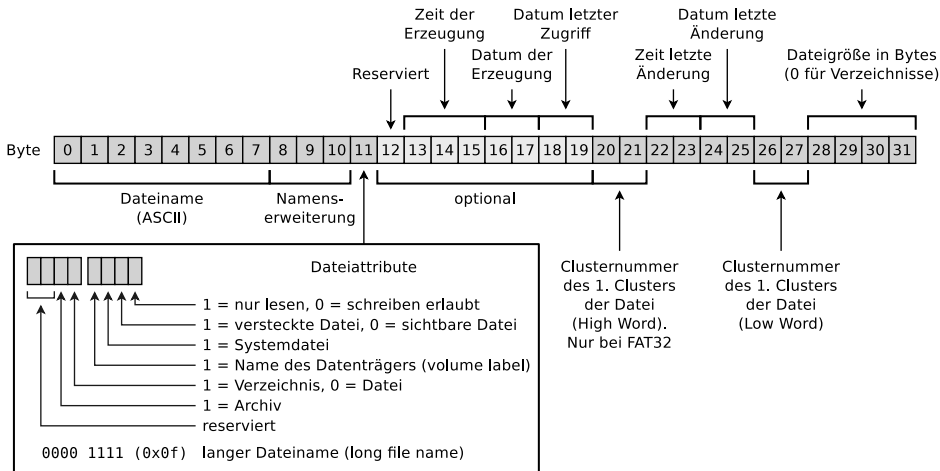
# Stammverzeichnis (Wurzelverzeichnis) und FAT



Das Thema FAT ist anschaulich erklärt bei...

- **Betriebssysteme**, Carsten Vogt, 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag (2001), S. 178-179

# Struktur der Einträge im Stammverzeichnis



Warum ist 4 GB die maximale Dateigröße unter FAT32?

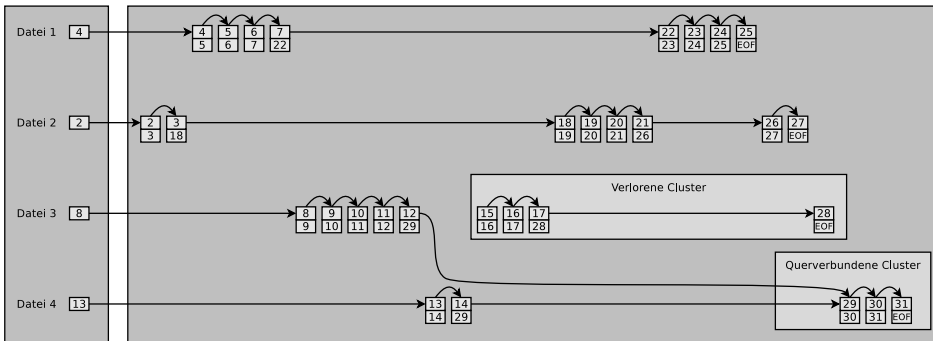
Es stehen nur 4 Bytes für die Angabe der Dateigröße zur Verfügung.

# Gefahr von Inkonsistenzen im Dateisystem

- Typische Probleme von Dateisystemen, die auf einer FAT basieren:
  - verlorene Cluster
  - querverbundene Cluster

Stammverzeichnis

Dateizuordnungstabelle (File Allocation Table)



Quelle: [http://www.sal.ksu.edu/faculty/tim/ossf/File\\_sys/file\\_system\\_errors.html](http://www.sal.ksu.edu/faculty/tim/ossf/File_sys/file_system_errors.html)

# FAT12

Erschien 1980 mit der ersten QDOS-Version

- Die Clusternummern sind 12 Bits lang
  - Maximal  $2^{12} = 4096$  Cluster können adressiert werden
- Clustergröße: 512 Bytes bis 4 kB
- Unterstützt nur Speichermedien (Partitionen) bis 16 MB

$2^{12} * 4 \text{ kB Clustergröße} = 16384 \text{ kB} = 16 \text{ MB maximale Dateisystemgröße}$

- Dateinamen werden nur im Schema 8.3 unterstützt
  - 8 Zeichen stehen für den Dateinamen und 3 Zeichen für die Dateinamenserweiterung zur Verfügung

Wird „heute“ nur für DOS- und Windows-Disketten eingesetzt

# FAT16

- Erschien 1983, da absehbar war, dass 16 MB Adressraum nicht ausreicht
- Maximal  $2^{16} = 65536$  Cluster können adressiert werden
  - 12 Cluster sind reserviert
- Clustergröße: 512 Bytes bis 256 kB
- Dateinamen werden nur im Schema 8.3 unterstützt
- Haupteinsatzgebiet heute: mobile Datenträger  $\leq 2$  GB

Partitionsgröße	Clustergröße
bis 31 MB	512 Bytes
32 MB - 63 MB	1 kB
64 MB - 127 MB	2 kB
128 MB - 255 MB	4 kB
256 MB - 511 MB	8 kB
512 MB - 1 GB	16 kB
1 GB - 2 GB	32 kB
2 GB - 4 GB	64 kB
4 GB - 8 GB	128 kB
8 GB - 16 GB	256 kB

Die Tabelle enthält die Standard-Clustergrößen unter Windows 2000/XP/Vista/7/8/10. Die Clustergröße kann beim Erzeugen des Dateisystems festgelegt werden

Einige Betriebssysteme (z.B. MS-DOS und Windows 95/98/Me) unterstützen keine Cluster  $> 32$  kB

Einige Betriebssysteme (z.B. Windows 2000/XP/7/8/10) unterstützen keine Cluster  $> 64$  kB

## Quellen:

<http://support.microsoft.com/kb/140365/de>  
<http://secrets.mysfyt.com/index.asp?Page=Fat>  
<http://web.allensmith.net/Storage/HDDlimit/FAT16.htm>

# FAT32

- Erschien 1997 als Reaktion auf die höhere Festplattenkapazität und weil Cluster  $> 32$  kB sehr viel Speicher verschwenden
- 32 Bits pro Eintrag in der FAT stehen für Clusternummern zur Verfügung
  - 4 Bits sind reserviert
  - Darum können nur  $2^{28} = 268.435.456$  Cluster adressiert werden
- Clustergröße: 512 Bytes bis 32 kB
- Maximale Dateigröße: 4 GB
  - Grund: Es stehen nur 4 Bytes für die Angabe der Dateigröße zur Verfügung
- Haupteinsatzgebiet heute: mobile Datenträger  $> 2$  GB

Partitionsgröße	Clustergröße
bis 63 MB	512 Bytes
64 MB - 127 MB	1 kB
128 MB - 255 MB	2 kB
256 MB - 511 MB	4 kB
512 MB - 1 GB	4 kB
1 GB - 2 GB	4 kB
2 GB - 4 GB	4 kB
4 GB - 8 GB	4 kB
8 GB - 16 GB	8 kB
16 GB - 32 GB	16 kB
32 GB - 2 TB	32 kB

Die Tabelle enthält die Standard-Clustergrößen unter Windows 2000/XP/Vista/7/8/10. Die Clustergröße kann beim Erzeugen des Dateisystems festgelegt werden

# Längere Dateinamen durch VFAT

- VFAT (Virtual File Allocation Table) erschien 1997
  - Erweiterung für FAT12/16/32, die längere Dateinamen ermöglicht
- Durch VFAT wurden unter Windows erstmals...
  - Dateinamen unterstützt, die nicht dem Schema 8.3 folgen
  - Dateinamen bis zu einer Länge von 255 Zeichen unterstützt
- Verwendet die Zeichenkodierung Unicode

## Lange Dateinamen – Long File Name Support (LFN)

- VFAT ist ein interessantes Beispiel für die Realisierung einer neuen Funktionalität unter Beibehaltung der Abwärtskompatibilität
- Lange Dateinamen (max. 255 Zeichen) werden auf max. 20 Pseudo-Verzeichniseinträge verteilt (siehe Folie 25)
- Dateisysteme ohne Long File Name Support ignorieren die Pseudo-Verzeichniseinträge und zeigen nur den verkürzten Namen an
- Bei einem VFAT-Eintrag in der FAT, haben die ersten 4 Bits im Feld **Dateiattribute** den Wert 1 (siehe Folie 18)
- Besonderheit: Groß/Kleinschreibung wird angezeigt, aber ignoriert



# Kompatibilität zu MS-DOS und Windows bis v3.11

- VFAT und NTFS (siehe Folie 38) speichern für jede Datei einen eindeutigen Dateinamen im Format 8.3
  - Betriebssysteme ohne die VFAT-Erweiterung ignorieren die Pseudo-Verzeichniseinträge und zeigen nur den verkürzten Dateinamen
    - So können Microsoft-Betriebssysteme ohne VFAT-Unterstützung auf Dateien mit langen Dateinamen zugreifen
- Problem: **Die kurzen Dateinamen müssen eindeutig sein**
- Lösung:
  - Alle Sonderzeichen und Punkte innerhalb des Namens werden gelöscht
  - Alle Kleinbuchstaben werden in Großbuchstaben umgewandelt
  - Es werden nur die ersten 6 Zeichen beibehalten
    - Danach folgt ein ~1 vor dem Punkt
  - Die ersten 3 Zeichen hinter dem Punkt werden beibehalten und der Rest gelöscht
  - Existiert schon eine Datei gleichen Namens, wird ~1 zu ~2, usw.
- Beispiel:  
Ein ganz langer Dateiname.test.pdf  $\implies$  EINGAN~1.pdf

# FAT-Dateisysteme analysieren (1/3)

```
# dd if=/dev/zero of=./fat32.dd bs=1024000 count=34
34+0 Datensätze ein
34+0 Datensätze aus
34816000 Bytes (35 MB) kopiert, 0,0213804 s, 1,6 GB/s
# mkfs.fat -F 32 fat32.dd
mkfs.fat 4.1 (2017-01-24)

# mkdir /mnt/fat32
# mount -o loop -t vfat fat32.dd /mnt/fat32/

# mount | grep fat32
/tmp/fat32.dd on /mnt/fat32 type vfat (rw,relatime,fmask=0022,dmask=0022,codepage=437,ioccharset=ascii,
    shortname=mixed,utf8,errors=remount-ro)
# df -h | grep fat32
/dev/loop0      33M    512   33M    1% /mnt/fat32

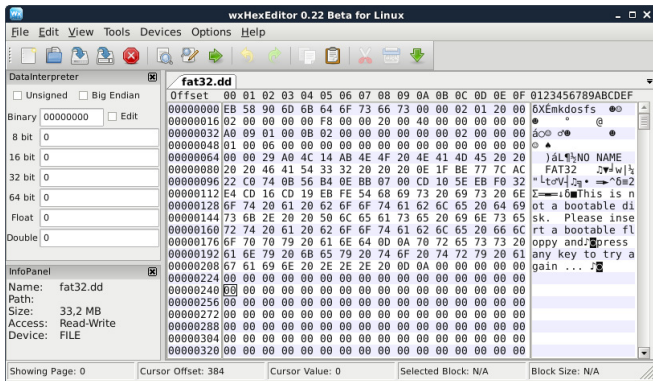
# ls -l /mnt/fat32
insgesamt 0

# echo "Betriebssysteme" > /mnt/fat32/liesmich.txt
# cat /mnt/fat32/liesmich.txt
Betriebssysteme
# ls -l /mnt/fat32/liesmich.txt
-rwxr-xr-x 1 root root 16 Mai 11 09:45 /mnt/fat32/liesmich.txt

# umount /mnt/fat32/
# mount | grep fat32
# df -h | grep fat32

# wxHexEditor fat32.dd
```

# FAT-Dateisysteme analysieren (2/3)



## Ein Hex-Editor stellt die Daten auf verschiedene Arten dar

- 1. Spalte: Anzahl der vorausgegangenen Bytes  $\Rightarrow$  Offset
- 2. Spalte: Bytes der Zeile in hexadezimaler Darstellung
- 3. Spalte: Bytes der Zeile in ASCII-Darstellung

## Einige Grundlagen...

- Hexadezimalsystem  $\Rightarrow$  Basis 16
- 1 Hex-Zeichen stellt 4 Bits dar
- 2 Hex-Zeichen stellen 1 Byte dar

<http://dorumugs.blogspot.de/2013/01/file-system-geography-fat32.html>

<http://www.win.tue.nl/~aeb/linux/fs/fat/fat-1.html>

# FAT-Dateisysteme analysieren (3/3)

wxHexEditor 0.22 Beta for Linux

File Edit View Tools Devices Options Help

DataInterpreter ☒ fat32.dd

☐ Unsigned ☐ Big Endian

Binary 00000000 ☐ Edit

8 bit 0

16 bit 0

32 bit 0

64 bit 0

Float 0

Double 0

InfoPanel ☒

Name: fat32.dd

Path:

Size: 33.2 MB

Access: Read-Write

Device: FILE

Showing Page: 985

Cursor Offset: 551920

Cursor Value: 0

Selected Block: N/A

Block Size: N/A

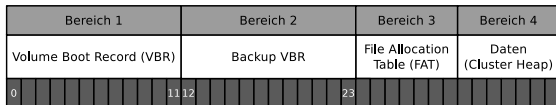
Hex Dump:

Offset	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	0123456789ABCDEF
00551920	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00551936	41	6C	00	69	00	65	00	73	00	6D	00	0F	00	61	69	00	Al i e s m * a i
00551952	63	00	68	00	2E	00	74	00	78	00	00	00	74	00	00	00	c h . t x t
00551968	4C	49	45	53	4D	49	43	48	54	58	54	20	00	64	B4	55	L I E S M I C H T X T d \ U
00551984	5C	44	5C	44	00	00	B4	55	5C	44	03	00	10	00	00	00	\ D \ D \ U \ D \ D \
00552000	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552016	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552032	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552048	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552064	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552080	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552096	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552112	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552128	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552144	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552160	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552176	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552192	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552208	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552224	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552240	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552256	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552272	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552288	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552304	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552320	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552336	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552352	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552368	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552384	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552400	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552416	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552432	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00552448	42	65	74	72	69	65	62	73	73	79	73	74	65	6D	65	0A	B e t r i e b s s y s t e m e
00552464	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	

## exFAT

- Veröffentlicht 2006 (patentrechtlich unbedenklich seit 2019)
- Bis zu  $2^{32} = 4.294.967.296$  Cluster können adressiert werden
- Clustergröße: 512 Bytes bis 32 MB
- Maximale Dateigröße: 16 EB ( $2^{64}$  Bytes)
- Einsatzgebiet: mobile Flash-Speicher ( $> 32$  GB)
  - Weniger Schreibzugriffe als Dateisysteme mit Journal (z.B. NTFS  $\Rightarrow$  Folie 38)

Das Stammverzeichnis (Wurzelverzeichnis) hat im Gegensatz zu den übrigen FAT-Dateisystemversionen kein feste Position. Es befindet sich innerhalb des Datenbereichs und liegt dort üblicherweise nicht am Stück vor, sondern fragmentiert.



↑ Bootsektor  
 ↑ Erweiterte Bootsektoren  
 ↑ OEM Parameter  
 ↑ Reservierter Sektor  
 ↑ Prüfsumme der Sektoren 0-10  
 ↑ Sicherheitskopie der Sektoren 0-11

Anfang und Größe der FAT und des Datenbereichs (Cluster Heap) sind variabel. Von beiden Bereichen sind jeweils der erste Sektor und die Anzahl der Sektoren im Bootsektor definiert

Partitionsgröße	Clustergröße
bis 256 MB	4 kB
256 MB - 32 GB	32 kB
32 GB - 256 TB	128 kB

Die Tabelle enthält die Standard-Clustergrößen unter Windows XP/Vista/7/8/10. Die Clustergröße kann beim Erzeugen des Dateisystems festgelegt werden  
<https://support.microsoft.com/de-de/kb/140365>

# Problematik von Schreibzugriffen

- Sollen Dateien oder Verzeichnisse erstellt, verschoben, umbenannt, gelöscht oder einfach verändert werden, sind Schreibzugriffe im Dateisystem nötig
  - **Schreiboperationen sollen Daten von einem konsistenten Zustand in einen neuen konsistenten Zustand überführen**
- Kommt es während eines Schreibzugriffs zum Ausfall, muss die Konsistenz des Dateisystems überprüft werden
  - Ist ein Dateisystem mehrere GB groß, kann die Konsistenzprüfung mehrere Stunden oder Tage dauern
  - Die Konsistenzprüfung zu überspringen, kann zum Datenverlust führen
- Ziel: **Die bei der Konsistenzprüfung zu überprüfenden Daten eingrenzen**
- Lösung: Mit einem Journal über die Schreibzugriffe Buch führen  
⇒ **Journaling-Dateisysteme**

# Journaling-Dateisysteme

- Diese Dateisysteme führen ein Journal, in dem die Schreibzugriffe gesammelt werden, bevor sie durchgeführt werden
  - In festen Zeitabständen werden das Journal geschlossen und die Schreiboperationen durchgeführt
- Vorteil: Nach einem Absturz müssen nur diejenigen Dateien (Cluster) und Metadaten überprüft werden, die im Journal stehen
- Nachteil: Journaling erhöht die Anzahl der Schreiboperation, weil Änderungen erst ins Journal geschrieben und danach durchgeführt werden
- 2 Varianten des Journaling:
  - **Metadaten-Journaling**
  - **Vollständiges Journaling**

Gute Beschreibungen der unterschiedlichen Journaling-Konzepte...

- **Analysis and Evolution of Journaling File Systems**, Vijayan Prabhakaran, Andrea C. Arpaci-Dusseau, Remzi H. Arpaci-Dusseau, 2005 USENIX Annual Technical Conference,  
[https://www.usenix.org/legacy/events/usenix05/tech/general/full\\_papers/prabhakaran/prabhakaran.pdf](https://www.usenix.org/legacy/events/usenix05/tech/general/full_papers/prabhakaran/prabhakaran.pdf)
- <http://www.ibm.com/developerworks/library/l-journaling-filesystems/index.html>

# Metadaten-Journaling und vollständiges Journaling

## ● Metadaten-Journaling (*Write-Back*)

- Das Journal enthält nur Änderungen an den Metadaten (Inodes)
  - Nur die Konsistenz der Metadaten ist nach einem Absturz garantiert
- Änderungen an Clustern führt erst das `sync()` durch ( $\implies$  Write-Back)
  - Der Systemaufruf `sync()` überträgt die Änderungen im Page Cache, auch = Buffer Cache genannt (siehe Folie 42), auf die HDD/SSD
- Vorteil: Konsistenzprüfungen dauern nur wenige Sekunden
- Nachteil: Datenverlust durch einen Systemabsturz ist weiterhin möglich
- Optional bei ext3/4 und ReiserFS
- NTFS und XFS bieten ausschließlich Metadaten-Journaling

## ● Vollständiges Journaling

- Änderungen an den Metadaten und alle Änderungen an Clustern der Dateien werden ins Journal aufgenommen
- Vorteil: Auch die Konsistenz der Dateien ist garantiert
- Nachteil: Alle Schreiboperation müssen doppelt ausgeführt werden
- Optional bei ext3/4 und ReiserFS

Die Alternative ist also hohe Datensicherheit und hohe Schreibgeschwindigkeit



# Kompromiss aus beiden Varianten: Ordered-Journaling

- Die meisten Linux-Distributionen verwenden standardmäßig einen Kompromiss aus beiden Varianten
- **Ordered-Journaling**
  - Das Journal enthält nur Änderungen an den Metadaten
  - **Dateiänderungen werden erst im Dateisystem durchgeführt und danach die Änderungen an den betreffenden Metadaten ins Journal geschrieben**
  - Vorteil: Konsistenzprüfungen dauern nur wenige Sekunden und ähnliche hohe Schreibgeschwindigkeit wie beim Metadaten-Journaling
  - Nachteil: Nur die Konsistenz der Metadaten ist garantiert
    - Beim Absturz mit nicht abgeschlossenen Transaktionen im Journal sind neue Dateien und Dateianhänge verloren, da die Cluster noch nicht den Inodes zugeordnet sind
    - Überschriebene Dateien haben nach einem Absturz möglicherweise inkonsistenten Inhalt und können nicht mehr repariert werden, da die alte Version nicht gesichert wurde
  - Beispiele: Einzige Alternative bei JFS, Standard bei ext3/4 und ReiserFS

Interessant: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Kernel-Entwickler-streiten-ueber-Ext3-und-Ext4-209350.html>

# Problem des Overheads für Verwaltungsinformationen

- Jeder Inode bei Blockadressierung adressiert eine bestimmte Anzahl Clusternummern direkt
- Benötigt eine Datei mehr Cluster, wird indirekt adressiert

Inode bei ext3/4 (Blockadressierung)

Clusteradresse 1 (direkt)
Clusteradresse 2 (direkt)
Clusteradresse 3 (direkt)
Clusteradresse 4 (direkt)
Clusteradresse 5 (direkt)
Clusteradresse 6 (direkt)
Clusteradresse 7 (direkt)
Clusteradresse 8 (direkt)
Clusteradresse 9 (direkt)
Clusteradresse 10 (direkt)
Clusteradresse 11 (direkt)
Clusteradresse 12 (direkt)
Clusteradresse 13 (indirekt)
Clusteradresse 14 (doppelt indirekt)
Clusteradresse 15 (dreifach indirekt)

32 Bits (4 Bytes)

Clusternummern (Daten der Datei)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13 - 268
269 - 65804
65805 - 16843020

maximal  
48 kB direkt  
adressierbar  
bei 4 kB  
Clustergröße

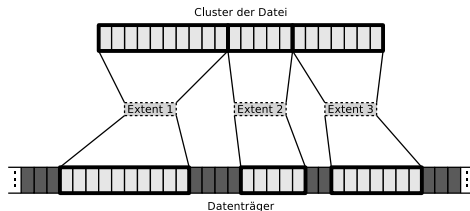
12 Cluster

256 Cluster  
65536 Cluster  
16777216 Cluster

- Dieses Adressierungsschema führt bei steigender Dateigröße zu zunehmendem Overhead für Verwaltungsinformationen
- Lösung: Extents

# Extent-basierte Adressierung

- Inodes adressieren nicht einzelne Cluster, sondern bilden möglichst große Dateibereiche auf Bereiche zusammenhängender Blöcke (**Extents**) auf dem Speichergerät ab
- Statt vieler einzelner Clusternummern sind nur 3 Werte nötig:
  - Start (Clusternummer) des Bereichs (Extents) in der Datei
  - Größe des Bereichs in der Datei (in Clustern)
  - Nummer des ersten Clusters auf dem Speichergerät
- Ergebnis: Weniger Verwaltungsaufwand
- Beispiele: JFS, XFS, btrfs, NTFS, ext4

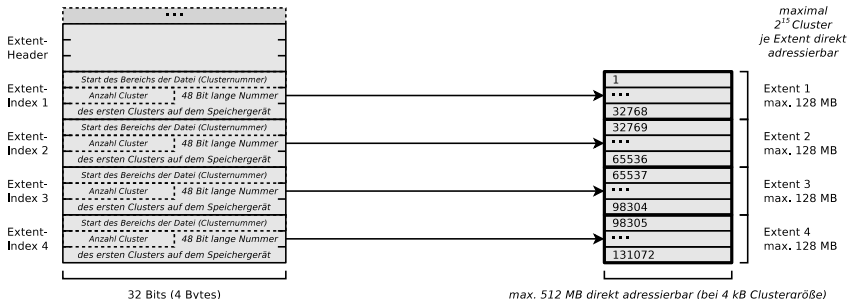


# Extents am Beispiel von ext4

- Bei Blockadressierung mit ext2/3 sind in jedem Inode 15 je 4 Bytes große Felder, also 60 Bytes, zur Adressierung von Clustern verfügbar
- ext4 verwendet diese 60 Bytes für einen Extent-Header (12 Bytes) und zur Adressierung von 4 Extents (jeweils 12 Bytes)

Inode bei ext4 (Extent-basierte Adressierung)

Clusternummern (Daten der Datei)

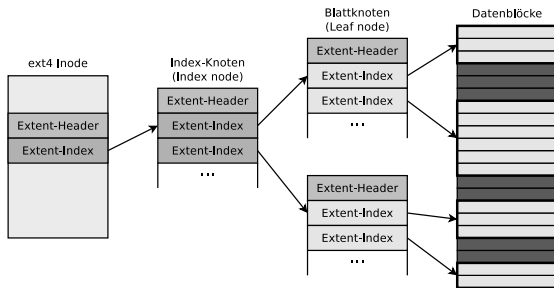


Extents können nicht größer als 128 MB ( $2^{15}$  Bytes) sein, weil ext4, genau wie seine Vorgänger ext2 und ext3, die Cluster des Dateisystems in sog. Blockgruppen (siehe Folie 10) mit einer maximalen Größe von 128 MB organisiert.

Maximale Partitionsgröße bei ext4:  $2^{48}$  Clusternummern  $\times$  4096 Byte Clustergröße = 1 Exabyte

# Vorteil von Extents am Beispiel von ext4

- Mit maximal 12 Clustern kann ein ext3/4-Inode 48 kB (bei 4 kB Clustergröße) direkt adressieren
- Mit 4 Extents kann ein ext4-Inode 512 MB direkt adressieren
- Ist eine Datei > 512 MB, baut ext4 einen Baum aus Extents auf
  - Das Prinzip ist analog zur indirekten Blockadressierung



Gute Beschreibungen zu Extents in ext4...

[https://ext4.wiki.kernel.org/index.php/Ext4\\_Disk\\_Layout#Extent\\_Tree](https://ext4.wiki.kernel.org/index.php/Ext4_Disk_Layout#Extent_Tree)

<https://www.sans.org/blog/understanding-ext4-part-3-extent-trees/>

<https://metebalci.com/blog/a-minimum-complete-tutorial-of-linux-ext4-file-system/>

An analysis of Ext4 for digital forensics: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742287612000357>

# NTFS – New Technology File System

## Verschiedene Versionen des NTFS-Dateisystems existieren

- NTFS 1.0: Windows NT 3.1
- NTFS 1.1: Windows NT 3.5/3.51
- NTFS 2.x: Windows NT 4.0 bis SP3
- NTFS 3.0: Windows NT 4.0 ab SP3/2000
- NTFS 3.1: Windows XP/2003/Vista/7/8/10

## Aktuelle Versionen von NTFS bieten zusätzlich...

- Unterstützung für Kontingente (Quota) ab Version 3.x
- transparente Kompression
- transparente Verschlüsselung (Triple-DES und AES) ab Version 2.x

- Clustergröße: 512 Bytes bis 64 kB
- NTFS bietet im Vergleich zu seinem Vorgänger FAT u.a.:
  - Maximale Dateigröße: 16 TB ( $\implies$  Extents)
  - Maximale Partitionsgröße: 256 TB ( $\implies$  Extents)
  - Sicherheitsfunktionen auf Datei- und Verzeichnisebene
- Genau wie VFAT...
  - speichert NTFS Dateinamen bis zu einer Länge von 255 Unicode-Zeichen
  - realisiert NTFS eine Kompatibilität zur Betriebssystemfamilie MS-DOS, indem es für jede Datei einen eindeutigen Dateinamen im Format 8.3 speichert

# Struktur von NTFS (1/2)

- Das Dateisystem enthält eine Hauptdatei – **Master File Table (MFT)**
  - Enthält die Referenzen, welche Cluster zu welcher Datei gehören
  - Enthält auch die Metadaten der Dateien (Dateigröße, Dateityp, Datum der Erstellung, Datum der letzten Änderung und evtl. den Dateiinhalt)
    - Der Inhalt kleiner Dateien  $\leq 900$  Bytes wird direkt in der MFT gespeichert

Quelle: **How NTFS Works**. Microsoft. 2003. [https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc781134\(v=ws.10\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc781134(v=ws.10).aspx)

- Beim Formatieren einer Partition wird für die MFT ein fester Bereich reserviert
  - Standardmäßig werden für die MFT 12,5% der Partitionsgröße reserviert
  - Ist der Bereich voll, verwendet das Dateisystem freien Speicher der Partition für die MFT
    - Dabei kann es zu einer Fragmentierung der MFT kommen (was bei Flash-Speicher keine negativen Auswirkungen hat)

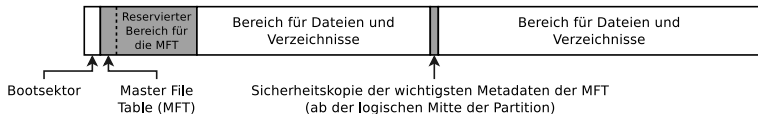
Partitionsgröße	Clustergröße
< 16 TB	4 kB
16 TB - 32 TB	8 kB
32 TB - 64 TB	16 kB
64 TB - 128 TB	32 kB
128 TB - 256 TB	64 kB

Die Tabelle enthält die Standard-Clustergrößen unter Windows 2000/XP/Vista/7/8/10. Die Clustergröße kann beim Erzeugen des Dateisystems festgelegt werden. Die Standardgröße ist 4 kB.

Quelle: <http://support.microsoft.com/kb/140365/de>

# Struktur von NTFS (2/2)

## Struktur des Dateisystems



## MFT-Eintrag einer Datei ( $\leq 900$ Bytes)

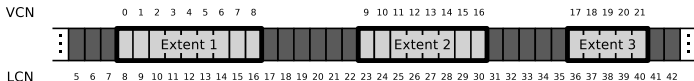
Datei-Attribute	Datei-Name	Zugriffsrechte (Security Descriptor)	Dateiinhalte
-----------------	------------	--------------------------------------	--------------

## MFT-Eintrag einer Datei mit Extents

Datei-Attribute	Datei-Name	Zugriffsrechte (Security Descriptor)	Verweise auf Extents ("Data Runs")			
			Extent	VCN	Anzahl Cluster	LCN
			1	0	9	8
			2	9	8	23
			3	17	5	36

(Länges jedes MFT-Eintrags: 1 kB)

## Datenträger



Verweist ein MFT-Eintrag auf Extents (sog. „Data Runs“), speichert er pro Extent 3 Werte

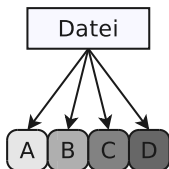
- Start (Clusternummer) des Bereichs (Extents) in der Datei  $\Rightarrow$  **Virtual Cluster Number (VCN)**
- Größe des Bereichs in der Datei (in Clustern)  $\Rightarrow$  **Anzahl Cluster**
- Nummer des ersten Clusters auf dem Speichergerät  $\Rightarrow$  **Logical Cluster Number (LCN)**

Auch ein Verzeichnis ist eine Datei (MFT-Eintrag), deren Dateiinhalte die Nummern der MFT-Einträge (Dateien) sind, die dem Verzeichnis zugeordnet sind.

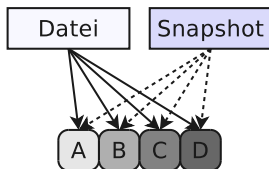


# Modernstes Konzept: Copy-On-Write

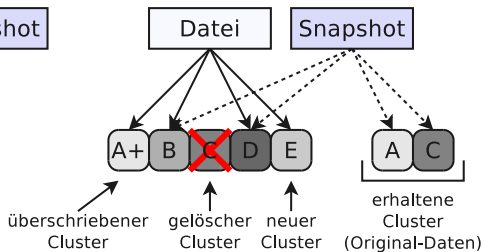
Vor dem Snapshot



Nach dem Snapshot



Nach Änderungen



- Schreibzugriffe im Dateisystem ändern/löschen keine Dateiinhalte
  - Veränderte Inhalte werden in freie Cluster geschrieben
  - Anschließend werden die Metadaten auf die neue Datei angepasst
- Ältere Dateiversionen bleiben erhalten und können wiederhergestellt werden
  - Die Datensicherheit ist besser als bei Dateisystemen mit Journal
  - Snapshots können sehr schnell erzeugt werden (nur Metadaten-Änderung)
- Beispiele: ZFS, btrfs und ReFS (Resilient File System)

# Datenzugriffe mit einem Cache beschleunigen (1/2)

- Moderne Betriebssysteme beschleunigen Datenzugriffe mit einem **Page Cache** (auch *Buffer Cache* genannt) im Hauptspeicher
  - Wird eine Datei lesend angefragt, schaut der Kernel zuerst im Page Cache nach, ob die Datei dort vorliegt
    - Liegt die Datei nicht im Page Cache vor, wird sie in diesen geladen
- Der Page Cache ist nie so groß, wie die Menge der Daten auf dem System
  - Darum müssen selten nachgefragte Daten verdrängt werden
    - Wurden Daten im Cache verändert, müssen die Änderungen spätestens beim Verdrängen nach unten durchgereicht (zurückgeschrieben) werden
    - Optimales Verwenden des Cache ist nicht möglich, da Datenzugriffe nicht deterministisch (nicht vorhersagbar) sind
- Die meisten Betriebssystemen geben Schreibzugriffe nicht direkt weiter (⇒ **Write-Back**)
  - Vorteil: Höhere System-Geschwindigkeit
  - Nachteil: Stürzt das System ab, kann es zu Inkonsistenzen kommen

## Datenzugriffe mit einem Cache beschleunigen (2/2)

- DOS und Windows bis Version 3.11 verwenden das Programm *Smartdrive* um einen Page Cache zu realisieren
  - Auch alle späteren Versionen von Windows enthalten einen *Cache Manager*, der einen Page Cache verwaltet
- Linux puffert automatisch so viele Daten wie Platz im Hauptspeicher ist
  - Das Kommando `free -m` gibt eine Übersicht der Speicherbelegung aus
    - Es informiert auch in der Spalte `buff/cache`, wie viel Speicherkapazität des Hauptspeichers gegenwärtig für den Page Cache verwendet wird

```
$ free -m
```

	total	used	free	shared	buff/cache	available
Mem:	15540	5774	1609	785	8156	8650
Swap:	10689	1	10688			

Gute Quellen zum Thema Page Cache unter Linux und wie man ihn manuell leeren kann

<https://askubuntu.com/questions/770108/what-do-the-changes-in-free-output-from-14-04-to-16-04-mean>  
[http://www.thomas-krenn.com/de/wiki/Linux\\_Page\\_Cache](http://www.thomas-krenn.com/de/wiki/Linux_Page_Cache)  
<http://unix.stackexchange.com/questions/87908/how-do-you-empty-the-buffers-and-cache-on-a-linux-system>  
<http://serverfault.com/questions/85470/meaning-of-the-buffers-cache-line-in-the-output-of-free>